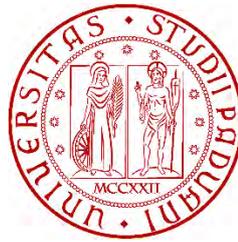


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA CIVILE

Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile ed Ambientale



TESI DI LAUREA MAGISTRALE

ADERENZA TRA COMPOSITI FRCM E CALCESTRUZZO: PROVE DI TAGLIO  
DIRETTO.

(BOND BEHAVIOUR BETWEEN FRCM COMPOSITES AND CONCRETE:  
DIRECT SHEAR TESTS)

Relatore: Prof. Ing. Carlo PELLEGRINO

Correlatore: Ing. Tommaso D'ANTINO

Laureando: Gazzola Edoardo

1033819 - IC

Anno Accademico 2014 - 2015



# INDICE

---

<b>INDICE.....</b>	<b>I</b>
<b>CAPITOLO 1 INTRODUZIONE.....</b>	<b>1</b>
<b>CAPITOLO 2 COMPOSITI FRCM .....</b>	<b>5</b>
2.1 I MATERIALI COMPOSITI FRCM .....	6
2.2 COMPOSIZIONE .....	7
2.2.1 FIBRE .....	8
2.2.2 MATRICE.....	11
2.2.3 LEGANTE .....	12
2.3 SISTEMI DI RINFORZO CON FRCM.....	12
2.4 APPLICAZIONI .....	14
2.4.1 POSSIBILITÀ DI INTERVENTO.....	14
2.4.2 METODI DI POSA .....	15
2.5 MECCANISMI DI CRISI .....	17
2.5.1 MECCANISMI DI CRISI NEGLI FRCM.....	17
2.6 COMPARAZIONE PRINCIPALI METODI DI RINFORZO STRUTTURALE .....	19
<b>CAPITOLO 3 STUDI E SPERIMENTAZIONI .....</b>	<b>21</b>
<b>CAPITOLO 4 CARATTERIZZAZIONE DEI MATERIALI UTILIZZATI.....</b>	<b>51</b>
4.1 PROVA DI COMPRESSIONE SUL CALCESTRUZZO .....	52
4.2 PROVA DI CARATTERIZZAZIONE MALTA ROCK S.....	53
4.2.1 CARATTERIZZAZIONE MALTA ROCK S PER FIBRA C-NET 170 BL .....	54
4.2.2 CARATTERIZZAZIONE MALTA ROCK S PER FIBRA G-NET 251 BA .....	57
4.2.3 CARATTERIZZAZIONE MALTA ROCK S PER ULTERIORI PROVE .....	57
4.3 PROVE DI TRAZIONE SULLE FIBRE .....	58
4.3.1 FIBRA DI CARBONIO C-NET 170 BL .....	59

4.3.2 FIBRA DI VETRO G-NET 251 BA .....	62
<b>CAPITOLO 5 SPERIMENTAZIONE E RISULTATI .....</b>	<b>65</b>
5.1 OGGETTO DELLA SPERIMENTAZIONE .....	65
5.2 PREPARAZIONE DEI PROVINI.....	65
5.2.1 PRIMO TURNO DI PROVE – C-NET 170 BL .....	66
5.2.2 SECONDO TURNO DI PROVE – G-NET 251 BA.....	71
5.2.3 TERZO TURNO DI PROVE – PROVINI AGGIUNTIVI E STRAIN GAUGES .....	73
5.3 PROSPETTO DEI PROVINI ESEGUITI.....	77
5.4 SETUP PER LA PROVA DI TAGLIO DIRETTO.....	78
5.5 RISULTATI .....	81
5.5.1 RISULTATI OTTENUTI.....	81
<b>CAPITOLO 6 CONCLUSIONI .....</b>	<b>109</b>
6.1 CONSIDERAZIONI FINALI.....	109
6.2 LAVORI FUTURI .....	110
<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>113</b>
<b>APPENDICE.....</b>	<b>115</b>

# CAPITOLO 1

## INTRODUZIONE

---

L'utilizzo dei materiali compositi, intesi come materiali ottenuti dall'unione di due o più i costituenti con diverse caratteristiche, ha origini che si perdono nel tempo. Fonti storiche ci portano a considerare che i primi casi di utilizzo di materiali compositi si possono fare risalire all'epoca degli Egizi. Già ai popoli di quel tempo erano evidentemente chiari i benefici che derivavano da questo genere di unione di materiali. L'intuizione, da parte di queste popolazioni, di mescolare il fango, con cui venivano fatti i mattoni, con comune paglia, portava alla produzione di un materiale che esaltava le caratteristiche migliori di entrambi i costituenti e ne limitava i difetti. Un altro esempio, cronologicamente più vicino e più conosciuto, è rappresentato dal calcestruzzo armato, che tutt'ora rappresenta uno dei materiali più in uso nelle costruzioni. In questo caso, andando ad aggiungere in modo opportuno barre o tondini di acciaio al calcestruzzo, si va a creare un nuovo materiale che nel suo complesso è capace di resistere a trazione e flessione, sollecitazioni che porterebbero facilmente al collasso il semplice calcestruzzo. Si arriva così a poter realizzare opere che altrimenti non sarebbero potute esistere.

Ai giorni nostri i composti fibrorinforzati sono entrati a pieno titolo tra i materiali di comune utilizzo in molti campi dell'ingegneria, in particolar modo nel settore delle costruzioni si stanno perfezionando particolari accoppiamenti di composti per far raggiungere livelli di performances superiori. In particolare negli ultimi anni la tecnologia dei composti fibrorinforzati, almeno per quanto riguarda l'ingegneria strutturale, si è orientata verso il recupero e la messa in sicurezza di opere strutturali danneggiate o verso l'incremento delle prestazioni richieste in seguito al cambio di una destinazione d'uso.

“E' sensazione comune, da parte di quanti sono impegnati in attività di ricerca o di progettazione nel campo del consolidamento con materiali compositi fibrorinforzati, che l'Italia stia assumendo una posizione particolare in ambito internazionale, sia per il valore dei contributi di conoscenza forniti, sia per la presenza di un patrimonio edilizio particolarmente vario ed importante. Ne fanno parte, infatti, costruzioni di rilevante importanza storica ed architettonica,

oltre che realizzazioni più recenti di muratura, di c.a., di c.a.p. e di acciaio. La maggior parte di queste ultime ha superato abbondantemente i trent'anni di vita, per cui molte di esse necessitano di interventi più o meno urgenti di riabilitazione strutturale (...)" [1].

Capita spesso però che le condizioni di carico iniziali nel corso degli anni subiscano grandi variazioni. Per fare un esempio, basta considerare una qualunque struttura che, dopo decine di anni di servizio, sia sottoposta ad un forte danneggiamento o ad una variazione di destinazione d'uso che comporti la nascita di sollecitazioni non previste dal progettista. Un'altra situazione potrebbe essere rappresentata da un edificio che si presta a dover soddisfare nuovi requisiti di sicurezza relativi al comportamento sismico, che non risultano soddisfatti in base alle nuove norme antisismiche. Altri campi di intervento mediante l'utilizzo di questa tecnologia possono riguardare i danni riportati in caso di incendi o di errori umani in fase di progettazione. Di fronte a queste situazioni ci si trova a dover ponderare la scelta di intervento in base ai costi e benefici, a decidere se optare per il recupero strutturale o la demolizione con successiva ricostruzione. Solitamente la prima soluzione è quella più conveniente in termini economici, nonostante possa essere complicata da effettuare. Questo è il motivo principale per cui l'attuale tendenza al recupero del patrimonio edilizio esistente ha spinto i progettisti e costruttori a porre l'attenzione sullo studio di nuove tecniche e materiali per il consolidamento che possano conservare l'integrità delle opere e far fronte al degrado a cui è sottoposto il patrimonio infrastrutturale esistente. Negli ultimi anni i materiali compositi sono stati oggetto di notevole interesse e di sviluppo nel campo dell'ingegneria civile, in quanto, grazie ai progressi tecnologici legati alla lavorazione e innovazione dei materiali, si sono ottenuti nuovi composti capaci di unire elevate prestazioni ad un peso modesto e ad un costo finale relativamente basso. Queste caratteristiche rendono tali materiali estremamente competitivi principalmente come sistemi di rinforzo di strutture esistenti. Nonostante in altri settori dell'ingegneria siano ampiamente utilizzati da molti anni, nell'ambito dell'ingegneria civile non c'è stata un'estesa applicazione come per i materiali convenzionali quali il calcestruzzo, l'acciaio ed il legno. Si può affermare, però, che negli ultimi anni il loro impegno ha avuto comunque un notevole incremento.

Tra i materiali compositi, i più utilizzati e conosciuti sono sicuramente i compositi fibrorinforzati a matrice polimerica (FRP – Fiber Reinforced Polymer). Questi materiali, essendo presenti sul mercato con diverse componenti (carbonio, vetro e aramide sono fra le più diffuse) e sotto svariate forme (barre di armatura, cavi di precompressione, laminati e tessuti in fibra monodirezionale o pluridirezionale) hanno largo impiego nel recupero edilizio e permettono l'ottimizzazione dell'uso del rinforzo. I vantaggi offerti dagli FRP sono l'elevata resistenza alla

corrosione, la resistenza agli attacchi chimici, l'estrema leggerezza e l'ottima resistenza meccanica offerta. I loro limiti sono spesso legati all'uso di resine epossidiche e riguardano il costo del materiale, la bassa resistenza al fuoco, la bassa traspirabilità, la necessità di applicazione su superfici abbastanza planari per evitarne il distacco, la tossicità e il conseguente impiego di manodopera specializzata. Questi svantaggi hanno spostato l'interesse verso i materiali compositi fibrorinforzati a matrice cementizia (FRCM – Fiber Reinforced Cementitious Matrix) che, rispetto agli FRP, presentano una maggiore versatilità soprattutto nelle applicazioni su murature e calcestruzzo. Il nuovo sistema di rinforzo strutturale in composito FRCM, a differenza degli FRP impiega una matrice inorganica che risulta perfettamente compatibile sotto il profilo fisico, chimico e meccanico con il supporto. In Italia la progettazione, l'esecuzione ed il controllo degli interventi di consolidamento statico mediante l'utilizzo di compositi fibrorinforzati sono regolamentati dalle istruzioni CNR-DT 200/2004 e dalle relative linee guida approvate nel luglio 2009.

In questo lavoro di tesi sono state condotte delle prove di taglio diretto su provini di calcestruzzo su cui sono state fatte varie applicazioni con diverse tipologie di compositi FRCM al fine di studiarne il meccanismo di rottura ed il trasferimento degli sforzi.

Il secondo capitolo dà un inquadramento alla tecnologia e alla normativa che interessa i materiali compositi FRCM e mostra i casi più frequenti in campo strutturale.

Il terzo capitolo riporta gli elaborati di alcune precedenti sperimentazioni, volti ad inquadrare l'argomento.

Nel quarto capitolo vengono riportate le prove di caratterizzazione dei materiali usati: calcestruzzo, fibre di carbonio, fibre di vetro e malta cementizia.

Nel quinto capitolo si mostrano le modalità di prova di taglio diretto e i risultati ottenuti da tale sperimentazione attraverso grafici, tabelle e documentazione fotografica.

L'ultimo capitolo, infine, riassume il lavoro svolto e ne trae le conclusioni e propone quelli che potrebbero essere i lavori futuri.



# CAPITOLO 2

## COMPOSITI FRCM

---

La crescente necessità di rafforzare, ripristinare ed adeguare simicamente strutture esistenti in calcestruzzo armato (RC) e strutture murarie, ha spinto l'ingegneria civile e l'industria delle costruzioni a sviluppare nuovi materiali innovativi. Proprio nell'ottica della riabilitazione strutturale da anni si sono affermati nel settore delle costruzioni i cosiddetti materiali fibrorinforzati.

Per definizione, i materiali compositi sono costituiti da due o più materiali, detti fasi, di natura diversa e macroscopicamente distinguibili, ed almeno due delle fasi presentano caratteristiche fisiche e meccaniche sufficientemente diverse tra loro in modo da impartire al composito proprietà differenti da quelle dei costituenti. Gli elementi costituenti fondamentali di questi nuovi materiali compositi sono la *matrice*, formata da un continuo omogeneo e isotropo, e il rinforzo, il quale immerso nella matrice costituisce l'elemento anisotropo del sistema.

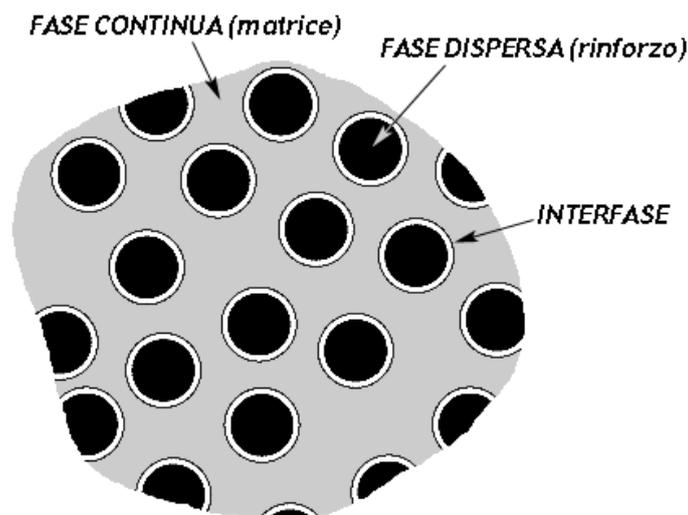


Fig. 2.1 – Composizione tipica di un composito fibrorinforzato. [1]

La **matrice** ha il compito di avvolgere e mantenere solidale la fase dispersa (rinforzo) e generalmente contribuisce parzialmente alle caratteristiche meccaniche finali. Fondamentale invece è data la sua bassa densità, per garantire la leggerezza del materiale composito. Ad ogni

modo nel caso di matrici cementizie o a base metallica, la leggerezza è conferita dalla dimensione ridotta dell'applicazione in termini di spessore.

A seconda dei tipi di matrice, i materiali compositi si suddividono in varie categorie, tra cui:

- compositi a matrice polimerica (termoplastici come il Nylon e l'ABS o termoindurenti come le resine epossidiche) FRP;
- compositi a matrice metallica (generalmente alluminio, o titanio e loro leghe);
- compositi a matrice ceramica (generalmente carburo di silicio o allumina);
- compositi carbonio-carbonio: sia la matrice che il rinforzo sono costituiti da carbonio;
- compositi ibridi: contengono due o più tipologie di fibre.
- compositi a matrice cementizia, FRCM;

Il **rinforzo** è rappresentato dalla fase dispersa immersa nella matrice. Tale materiale ha il compito di assicurare rigidità e resistenza meccanica, assumendo su di sé la maggior parte delle sollecitazioni a cui il composito è sottoposto. In base alla natura del rinforzo è possibile avere diverse tipologie di materiale composito:

- compositi particellari;
- compositi rinforzati con fibre;
- compositi strutturati (ad esempio pannelli a sandwich, materiali compositi laminati e pannello composito in alluminio).

L'**interfaccia** solitamente è uno strato molto sottile (spesso monoatomico), localizzato alla superficie del rinforzo, le cui caratteristiche, pur non contribuendo direttamente alle proprietà meccaniche globali del composito, sono tuttavia fondamentali per il successo del sistema complessivo nelle applicazioni strutturali.

## 2.1 I MATERIALI COMPOSITI FRCM

Una grossa fetta dei materiali fibrorinforzati utilizzati nel campo del retrofit e dell'adeguamento strutturale è composta dai materiali polimerici fibrorinforzati (FRP). Essi sono costituiti da fibre ad alta resistenza (ad esempio carbonio, vetro o fibra aramidica) e una resina termoindurente (organica), tipicamente epossidica, usata come matrice. Sebbene i compositi FRP siano stati ampiamente studiati sia per il calcestruzzo armato che per le applicazioni in muratura, alcune problematiche affliggono questo tipo di tecnologia. Per superare questi problemi, le matrici

organiche possono essere sostituite dalle matrici inorganiche di più recente sviluppo. Sebbene in letteratura vengano chiamati in modi differenti, a seconda delle fibre e dei materiali impiegati, i compositi costituiti da fibre ad alta resistenza immerse in una matrice cementizia sono solitamente definiti materiali compositi fibrorinforzati a matrice cementizia (FRCM). Sono molti i vantaggi di questa nuova famiglia di materiali compositi, primo tra tutti è la capacità di resistenza al fuoco che è paragonabile a quella del substrato di calcestruzzo o muratura. È noto che le matrici a base di resine organiche subiscono un processo di deterioramento per temperature alle quali si presenta la transizione vetrosa e si degradano progressivamente se esposte ai raggi UV, vanificando le prestazioni della tecnologia FRP. Altra caratteristica importante risiede sulla permeabilità che i compositi FRCM offrono, paragonabile comparabile con il supporto. La matrice cementizia di tale composito permette gli scambi termometrici con l'esterno, tale possibilità è invece preclusa nel caso di compositi FRP in quanto la matrice è impermeabile e la naturale umidità presente all'intero degli elementi strutturali non è libera di fuoriuscire. Da non sottovalutare la possibilità di adesione da parte degli FRCM su superfici umide, cosa impossibile per le resine degli FRP, e la facilità di applicazione nonostante la superficie possa essere irregolare.

## 2.2 COMPOSIZIONE

È conveniente, ai fini dell'esame delle loro proprietà, distinguere i compositi fibrorinforzati in due categorie principali, indipendentemente dalla tecnologia di produzione [1]:

- **monostrato** (lamina) sono in generale dei materiali anisotropi e conseguentemente la descrizione delle loro proprietà meccaniche dipende dalla scelta del sistema di riferimento. Di solito gli assi del riferimento vengono fatti coincidere con quelli di simmetria del materiale;
- **multistrato** (laminati) – sono materiali costituiti da strati di qualche decimo di millimetro di spessore sovrapposti fra loro. Nel caso più semplice, le fibre sono contenute esclusivamente nel piano della lamina (non sono presenti fibre disposte perpendicolarmente a tale piano). Le dimensioni dei laminati sono intermedie fra quelle delle fibre di rinforzo e quelle delle strutture di interesse ingegneristico. Il principale vantaggio dei laminati è rappresentato dalla massima libertà nella disposizione delle fibre, pur essendo ovviamente richiesto un controllo sistematico sulle scelte operate e quindi sulle proprietà del materiale composito.

Verranno brevemente illustrati i costituenti più utilizzati nel campo dei compositi FRCM e le caratteristiche fisico-chimiche principali.

## 2.2.1 FIBRE

La fibra è la parte costituente il rinforzo che ha il compito di esercitare la funzione resistente vera e propria. Nella realizzazione dei compositi le fibre possono essere continue o discontinue, nel primo caso la loro disposizione è allineata a formare dei nastri, dei tessuti o delle lamine anche di grandi dimensioni, mentre nel secondo caso le fibre sono corte e la loro disposizione è usualmente casuale. Le fibre maggiormente diffuse sono quelle di carbonio, vetro e aramide, la loro geometria filiforme, con le quali si trovano in commercio, garantisce una grande versatilità nelle applicazioni e vi conferisce spiccate caratteristiche di rigidità e resistenza rispetto al loro uso tridimensionale, questo grazie alla diminuzione dei difetti che spesso sono causa di innesco di crisi locali.

### 2.2.1.1 Fibra di carbonio

Il termine “fibre di carbonio” indica fibre con un contenuto di carbonio variabile tra l’80 ed il 95%. Le fibre di carbonio sono usate per la fabbricazione di compositi ad elevate prestazioni, esse esibiscono un comportamento a rottura fragile caratterizzato da un assorbimento di energia relativamente modesto anche se le tensioni di rottura sono elevate, risultano, però, le meno sensibili (rispetto alle fibre di vetro ed aramide) ai fenomeni di scorrimento viscoso (creep) e di fatica essendo contraddistinte da una modesta riduzione della resistenza a lungo termine. La resistenza specifica delle fibre di carbonio (circa 40 volte superiore al comune acciaio d’armatura FeB44K) è il parametro che maggiormente caratterizza le scelte di mercato. [1]



Fig. 2.2 – Esempio di tessuto bidirezionale di fibra di carbonio intrecciata. [9]

Le tipologie di fibre più diffuse vengono denominate come carbonio ad alta tenacità (HT), ad alto modulo (HM) e ad altissimo modulo (UHM). Nelle applicazioni edilizie si prediligono le

fibre standard o ad alta tenacità; le fibre ad alto e altissimo modulo, invece, vengono utilizzate solo in casi particolari.

Vengono mostrate le caratteristiche dei principali tipi di carbonio utilizzato e confrontate con quelle dell'acciaio.

Materiale	Densità [kg/m <sup>3</sup> ]	Modulo Elastico [GPa]	Resistenza a Trazione [MPa]	Deformazione a Rottura [%]	Resistenza Specifica [Mpa * m <sup>3</sup> /kg]
Carbonio ad alta resistenza	1800	230	5000	2	2,78
Carbonio ad alto modulo (HM)	1850	400	3000	0,9	1,62
Carbonio ad altissimo modulo	2100	700	1500	0,3	0,71
Acciaio FeB44K	7850	210	540	20	0,07

Tab. 2.1 – Caratteristiche dei tipi di carbonio generalmente utilizzati. [9]

### 2.2.1.2 Fibra di vetro

Sono fibre che si caratterizzano per la loro elevata resistenza. Il vetro è composto principalmente da silice (SiO<sub>2</sub>) in struttura tetraedrica (SiO<sub>4</sub>) alla quale sono aggiunti, in varie proporzioni, ossidi di alluminio ed altri ioni metallici per facilitare le operazioni di lavorazione o per modificare alcune proprietà.

La designazione tecnica delle fibre di vetro viene effettuata secondo le norme ISO 1139/1973 e ISO 2078/1993. Le fibre di vetro hanno un modulo di Young (E) inferiore a quello delle fibre di carbonio e di aramide, offrono una resistenza all'abrasione relativamente modesta, che richiede una certa cura nella manipolazione durante la messa in opera; questo tipo di fibra ha un'elevata attitudine allo scorrimento viscoso ed una modesta resistenza a fatica. Le fibre di vetro, se non preventivamente trattate, sono vulnerabili all'azione basica della matrice cementizia. Gli ioni K<sup>+</sup> e Na<sup>+</sup>, infatti, possono reagire con la silice amorfa (SiO<sub>2</sub>, principale costituente del vetro) generando una forma gelatinosa di silicati alcalini idrati, con conseguente degrado delle fibre di vetro e relativa riduzione delle prestazioni meccaniche, per evitare il verificarsi di tale problematica e per facilitare l'adesione tra fibre e matrice durante la messa in opera, le fibre sono sottoposte a trattamenti con sostanze aventi funzione di compatibilizzare la fibra con l'ambiente generato dalla matrice (ossido di zirconio). Tali trattamenti sono molto utili anche ai fini della durabilità e della resistenza a fatica.



Fig. 2.3 – Esempio di tessuto di fibra di vetro bidirezionale. [9]

Vengono mostrate le principali tipologie di fibra di vetro utilizzate nella produzione di compositi fibrorinforzati.

Tipo di fibra	Componenti	Proprietà Caratteristiche
E-glass	Silicato di calcio	Ordinarie - Uso generico
ECR-glass	Silicato di calcio in assenza di boro	Resistenza agli acidi
S-glass	Silicato di magnesio	Resistenza meccanica ed al calore
C-glass	Carbonato di sodio-calce-borosilicato	Alta resistenza alla corrosione
AR-glass	Ossidi di alluminio, calcio, magnesio, zirconio e torio	Resistenza agli alcali - Uso in matrice cementizia

Tab. 2.2 – Tipologie più diffuse di fibra di vetro. [9]

Delle tipologie più comuni se ne mostrano le caratteristiche meccaniche principali

Materiale	Densità [kg/m <sup>3</sup> ]	Modulo Elastico [GPa]	Resistenza a Trazione [MPa]	Deformazione a Rottura [%]	Resistenza specific [Mpa * m <sup>3</sup> /kg]
Fibre di vetro tipo E	2550	70	3500	3,8	1,37
Fibre di vetro tipo S	2500	90	4700	5,5	1,88
Acciaio FeB44K	7850	210	540	20	0,07

Tab. 2.3 – Caratteristiche delle tipologie di fibra di vetro più diffuse. [9]

## 2.2.2 MATRICE

Le matrici inorganiche cementizie sono prodotti di recentissima immissione nel campo dei materiali compositi con fibre. Sono costituite da un legante idraulico pozzolanico e da additivi specifici che favoriscono lo sviluppo di caratteristiche meccaniche e fisiche differenti da quelle tipiche degli FRP con matrici organiche a base polimerica, tra cui le più utilizzate sono le resine epossidiche. Nelle seguenti tabelle cercherò di sintetizzare le principali differenze fisico-meccaniche delle due matrici. La valutazione critica di tali differenze da parte di chi concepisce un rinforzo in materiale composito, è alla base una corretta scelta progettuale.

Nella seguente tabella vengono mostrate le principali differenze tra matrici inorganiche a base cementizia e matrici di origine organica.

Matrice	Modulo Elastico [GPa]	Resistenza a Trazione (per flessione) [MPa]	Resistenza alle alte temperature	Tossicità	Pulizia attrezzi usati per la posa	Comportamento a rottura	Viscosità
Cementizia	6	3,5 (a 28 gg)	Identica a quella del supporto in calcestruzzo	Nulla	Con sola acqua	Duttile	Alta allo stato fluido e quindi difficile impregnazione delle fibre
Resina Epossidica	2,7 - 3,6	40 - 82	Perdono le loro caratteristiche strutturali e di adesione già ad 80°C	Pericolosità sia per contatto che per inalazione	Con solventi nitro ed acetone	Fragile	Bassa allo stato fluido e quindi facile impregnazione delle fibre

Tab. 2.4 – Confronto tra matrice cementizia e matrice organica. [9]

Questa tecnologia nasce per ovviare a quei problemi e a quelle limitazioni che si riscontrano nelle fasi di applicazione e di posa in opera dei rinforzi a matrice polimerica [CNR-DT 200/2004]. La matrice cementizia è costituita da una malta speciale ottenuta con cementi di tipo pozzolanico, da miscelarsi con la sola aggiunta di acqua.

I vantaggi che presentano si possono così riassumere:

- migliore operatività in cantiere, essendo prodotti che non richiedono procedure particolari, ma del tutto simili alle malte tradizionali;
- elevata resistenza al fuoco e buona resistenza ai raggi UV;
- permeabilità comparabile a quella del supporto: il sistema di rinforzo FRCM permette il normale scambio termico igrometrico della struttura rinforzata con l'esterno;

- applicabilità su supporti umidi: l'umidità presente nelle strutture infatti non inficia il normale indurimento della malta cementizia, anzi, come per il calcestruzzo, ne migliora l'adesione;
- applicabilità su supporti scabri e irregolari: la malta cementizia è in grado di riempire eventuali irregolarità che possono essere presenti sulla superficie del supporto.

Una caratteristica negativa risiede invece nelle condizioni ambientali della messa in opera, che dovrebbe avvenire in un intervallo di temperatura compresa fra 5°C e 35°C in quanto a temperature più alte si riduce notevolmente la lavorabilità della malta, mentre a temperatura più bassa rallenta la presa. Questa problematica è comunque presente anche nelle resine organiche che hanno, in linea di massima, lo stesso intervallo di temperatura ottimale per la preparazione e la messa in opera. L'utilizzo di una matrice inorganica riduce significativamente l'impregnazione delle singole fibre nei fasci e di conseguenza riduce la forza di incollaggio. Una malta cementizia polimero-modificata risulta dare un miglior legame fra la matrice e le fibre ed una migliore resistenza durevolezza; essa è quindi la malta inorganica più promettente per il sistema FRCM.

### 2.2.3 LEGANTE

Il legante, che può essere presente o meno, permette l'aderenza, e di conseguenza la trasmissione delle sollecitazioni, nell'interfaccia fibra-matrice. Generalmente un legame di interfaccia forte rende il materiale composito più rigido, ma di conseguenza più fragile, mentre un legame più debole incrementa la tenacità del composito riducendone inevitabilmente la resistenza.

## 2.3 SISTEMI DI RINFORZO CON FRCM

Di seguito vengono descritti i quattro diversi approcci maggiormente utilizzati per il ripristino strutturale.

- Textile Reinforced Concrete (TRC)

Questa tecnica prevede l'utilizzo di un tessuto come materiale di rinforzo e di una malta cementizia a grana fine e ad alta resistenza come matrice. È un tipo di rinforzo che si può usare sia a flessione che a taglio.

- Fibre Reinforced Cement (FRC)

È un sistema di rinforzo costituito da un foglio di fibre o tessuto impregnato in una matrice a base cementizia. La combinazione di questi due materiali si traduce in un sottile foglio di materiale composito caratterizzato da prestazioni molto elevate e ottima durabilità e duttilità durante le prove a flessione. L'applicazione di questo tipo di rinforzo si differenzia dagli altri, infatti in questo caso il foglio o tessuto viene tagliato a misura e immerso nella matrice. Una volta impregnato viene poi applicato direttamente alla superficie di calcestruzzo. Con il rinforzo FRC si possono effettuare sia rinforzi a confinamento che a flessione.

- Textile Reinforced Mortar (TRM)

Questo sistema di rinforzo è simile al sistema TRC. I tessuti utilizzati sono in fibra di carbonio e il legante è una malta modificata con polimeri.

- Mineral Based Composites (MBC)

Questo sistema contiene tre componenti: il legante cementizio, la rete e il primer. Il metodo prevede la preparazione della superficie di calcestruzzo al fine di migliorare l'adesione fra i materiali e l'applicazione del primer per impedire il trasporto di umidità dalla malta al substrato. Il primo strato di malta viene applicato direttamente sulla superficie di calcestruzzo impregnata, successivamente viene posata la rete seguita da un ulteriore strato di malta. Con il rinforzo MBC si possono effettuare sia rinforzi a taglio che a flessione.

## 2.4 APPLICAZIONI

E' necessario studiare ogni specifica applicazione e scegliere i componenti che garantiscano la migliore compatibilità fisico-chimica e meccanica sia tra fibra e matrice costituenti il rinforzo, sia nei confronti del supporto da trattare. Non è possibile l'accoppiamento casuale di rinforzi e matrici qualsiasi, senza che esistano prove sperimentali ed applicative delle loro proprietà distinte, di quelle del composito risultante e dell'insieme supporto-rinforzo. Il successo dell'intervento dipende infatti in maniera determinante dall'adesione tra supporto e rinforzo, dalla corretta impregnazione della fibra con la matrice e dalla giusta disposizione delle fibre. La perfetta aderenza tra composito e supporto permette il trasferimento delle tensioni, ed è un requisito necessario per l'efficacia del rinforzo, particolarmente nel caso in cui si operi su strutture sollecitate da azioni taglianti o inflesse. Le fasi operative da seguire per realizzare un intervento sono:

- valutazione preventiva del substrato;
- preparazione della superficie;
- posa in opera dei tessuti (tecnica "wet lay up" oppure "dry lay up");
- protezione superficiale;

### 2.4.1 POSSIBILITÀ DI INTERVENTO

#### 2.4.1.1 Applicazioni per contatto

Nelle applicazioni per contatto, quale il confinamento di un elemento compresso, non è necessario garantire una aderenza perfetta tra il materiale di rinforzo ed il supporto. La preparazione della superficie può quindi limitarsi ad una spazzolatura, alla rimozione dei detriti e ad una lisciatura con malta, per evitare che eventuali asperità generino delle concentrazioni di tensioni dannose non previste e possano danneggiare il composito.



Fig. 2.4 – Esempio di applicazione per contatto, cerchiatura di un pilastro. [12]

### 2.4.1.2 Applicazioni per aderenza

Nelle applicazioni per aderenza, come i rinforzi a flessione ed a taglio, la superficie esterna dell'elemento strutturale va adeguatamente preparata, in modo da assicurare la perfetta adesione del rinforzo. Eventuali porzioni di materiale danneggiato vanno rimosse e sostituite con malta o altri materiali adatti; eventuali fessure devono essere riempite opportunamente per non dare luogo ad eventuali sconnessioni della superficie che potrebbero innescare concentrazioni di tensioni parassite.

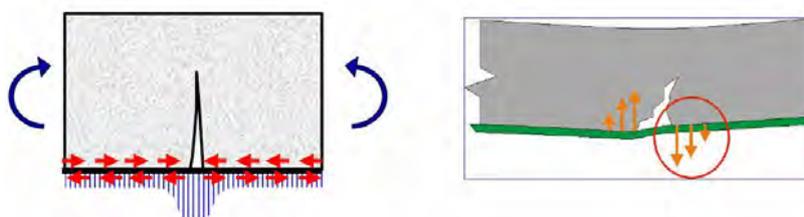


Fig. 2.5 – Esempi di meccanismo resistente in applicazioni per aderenza. [12]

### 2.4.2 METODI DI POSA

Successivamente alla preparazione della superficie da rinforzare si procede con la posa del tessuto. Questa operazione può essere eseguita con due diverse tecniche:

- lavorazione “a secco” (dry lay up) – adatta per lavori di piccola estensione;
- lavorazione “in umido” (wet lay up) – adatta per applicazioni su grandi superfici.

Nel caso si parli di FRCCM i sistemi di rinforzo strutturale che si possono usare sono solo i dry lay up system a causa dell'applicazione solamante in situ della matrice cementizia.

### 2.4.2.1 Lavorazione a secco – dry lay up

Si applica il tessuto orientando le fibre nella direzione prevista dal progetto, quindi, si impregna con resina epossidica o con malta cementizia rispettivamente utilizzando rulli o spatole per una corretta ed uniforme stesura cercando il più possibile di eliminare bolle d'aria altrimenti nocive per la resa finale; se necessario si potranno sovrapporre altri strati seguendo le stesse modalità.



Fig. 2.6 – Applicazione tipica di composito FRCM con metodologia dry lay-up. [12]

### 2.4.2.2 Lavorazione in umido – wet lay up

La tecnica si differenzia dalla precedente per le modalità con cui il tessuto viene posizionato, questo, infatti, viene preventivamente tagliato secondo le misure progettuali, quindi, impregnato a piè d'opera immergendolo in un bacile contenente la matrice (generalmente questa metodologia viene praticata con gli FRP e non con i rinforzi a matrice inorganica) molto fluida. Dopo aver estratto il tessuto dal recipiente viene strizzato con dei rulli per eliminare la matrice in eccesso e viene posizionato sul supporto con le fibre orientate nella direzione voluta, in fine si completa l'opera rullando quanto appena posizionato per eliminare le bolle d'aria.



Fig. 2.7 – Preparazione del tessuto all'impregnazione, metodo wet lay up. [12]

## 2.5 MECCANISMI DI CRISI

Negli ultimi decenni gli FRP sono stati ampiamente studiati e sono state pubblicate alcune linee guida per aumentarne le applicazioni. La letteratura per quanto riguarda gli FRCM è molto limitata e non sono ancora disponibili degli studi completi sul meccanismo di trasferimento delle tensioni tipico degli FRCM. Il limitato materiale disponibile in letteratura scientifica in materia di compositi FRCM riporta che il punto critico di questa tecnologia è localizzabile all'interfaccia matrice-fibra piuttosto che all'interno del substrato o all'interfaccia matrice-calcestruzzo, come tipicamente osservato con materiali compositi FRP. Il cedimento nei legami FRCM-calcestruzzo è causato da una progressiva delaminazione della fibra dalla matrice, caratterizzata da grandi scorrimenti all'interfaccia matrice-fibra. Inoltre, il processo di delaminazione è complicata dal cosiddetto comportamento telescopico, un meccanismo che porta ad un comportamento differenziale delle fibre all'interno del fascio, principalmente a causa della diversa impregnazione nella matrice da parte dei filamenti esterni rispetto ai filamenti interni. In base alle prove riportate in letteratura, poiché il distacco che avviene all'interno del composto, le proprietà meccaniche del substrato potrebbero essere meno rilevanti rispetto a quelle nelle applicazioni FRP, mentre la matrice e di conseguenza l'adesione matrice-fibra svolgeranno il ruolo fondamentale. Per questo motivo, i risultati sperimentali degli accoppiamenti FRCM-calcestruzzo dovrebbero essere simili ai risultati degli accoppiamenti FRCM muratura, a condizione che la criticità dell'FRCM nelle applicazioni su muratura sia ancora una volta localizzata all'interfaccia matrice-fibra.

### 2.5.1 MECCANISMI DI CRISI NEGLI FRCM

I meccanismi di crisi dei materiali compositi a matrice inorganica (cementizia) si differenziano sostanzialmente da quelli a matrice organica (resina epossidica) per le modalità con cui si manifestano. Generalmente il collasso di provini rinforzati con questi compositi risulta più duttile di quella dei medesimi provini rinforzati con FRP, anche se pagano in termini di carico ultimo di rottura.

Il perché di questa maggiore duttilità è concepibile se focalizziamo la nostra attenzione su un composito unidirezionale sollecitato a trazione parallela alle fibre (prova di pull-out).

#### 2.5.1.1 Prove di Pull-out

Per testare il comportamento di un composito unidirezionale sollecitato a trazione parallela alle fibre ed individuare il meccanismo che porta ad una rottura meno repentina e quindi

considerabile più duttile, si può fare riferimento ad una prova di pull-out che valuti l'interazione tra fibre e matrice cementizia. In particolare questo tipo di prova sperimentale, a carattere semi-distruttivo, consiste nell'estrarre la fibra da una matrice solida per valutarne l'interazione e la resistenza dei materiali testati.

Il comportamento durante la prova è condizionato dalla forte adesione che i filamenti più esterni del filato sviluppano con la matrice, mentre quelli più interni si lasciano scivolare come avvolti da una guaina. Questo avviene perché l'impregnazione della fibra da parte della malta non avviene in maniera omogenea.

In linea di principio quanto appena esposto non deve lasciare stupiti, in quanto, a differenza delle resine epossidiche che compongono i classici FRP, le malte utilizzate nei rinforzi a matrice cementizia hanno nel loro impasto la polvere di cemento che, per quanto possa essere fine difficilmente riesce a penetrare negli spazi tra i filamenti di fibra.

Il meccanismo di rottura che si evidenzia prende il nome di "telescopic failure"; questo nome, che letteralmente significa "rottura telescopica", deriva proprio dalla modalità con cui si manifesta il successivo sfilamento dei filamenti (rottura di pull-out) che si protrae dagli strati più esterni fino al nucleo del filato e si combina ad un secondo meccanismo di crisi che coinvolge i filamenti più esterni, i quali, prima di subire l'estrazione dalla matrice cementizia, giungono a rottura per il superamento della resistenza a trazione ultima (rottura a trazione). In questo modo la perdita di efficacia del rinforzo diminuisce gradualmente garantendo una maggiore dissipazione di energia di rottura (e quindi la duttilità che li contraddistingue).

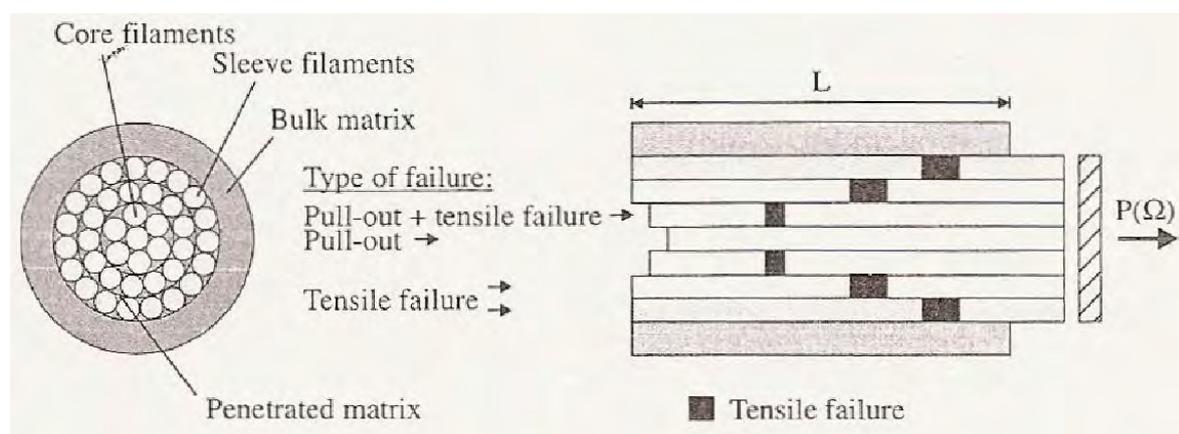


Fig. 2.8 – Esempio di rottura della fibra nei compositi FRCM [12]

## 2.6 COMPARAZIONE PRINCIPALI METODI DI RINFORZO STRUTTURALE

Nella Tab. 2.5 viene proposta una comparazione dei principali vantaggi che si possono avere con l'applicazione di un particolare materiale in un intervento di recupero su un edificio. La comparazione è fatta considerando tutte le caratteristiche in positivo e con una scala di valori del tipo alto-medio-basso in modo da poter effettuare un confronto più immediato.

Caratteristica	FRP	FRCM	Acciaio	CIs
Progettabilità del rinforzo	alta	alta	bassa	bassa
Non invasività	alta	alta	media	bassa
Possibilità di spessori ridotti	alta	alta	media	bassa
Applicazioni senza incrementi di carico	alta	alta	bassa	bassa
Non alterazione dell'aspetto	alta	alta	media	media
Applicabilità in geometrie complesse	alta *	alta	bassa	alta
Leggerezza	alta	alta	bassa	bassa
Compatibilità con il supporto	media	alta	alta	bassa
Applicazione a secco	alta	media	alta	bassa
Traspirabilità e permeabilità	nulla	media	alta	media
Resistenza meccanica	alta	alta	media	media
Rapporto resistenza/densità	alta	alta	media	bassa
Resistenza al fuoco	bassa	alta	bassa	alta
Rapidità di esecuzione	alta	alta	media	bassa
Organizzazione del cantiere semplificata	alta	alta	media	bassa
Economicità dell'intervento	bassa	bassa	media	alta
Impiego di manodopera non specializzata	nulla	media	media	alta
Tolleranza dei difetti di applicazione	bassa	media	media	alta
Non tossicità degli elementi	bassa	alta	alta	alta
Poca richiesta di manutenzione	alta	alta	bassa	alta
Resistenza agli attacchi chimici	media **	media	bassa	bassa
Durabilità degli interventi	***	***	media	media
Reversibilità	alta	bassa	media	bassa
* non vale per i compositi preformati; ** dipende fortemente dal tipo di matrice e di fibra; ***negativa in considerazione della carenza di dati				

Tab. 2.5 – Confronto fra le caratteristiche dei diversi tipi di intervento [9].



# CAPITOLO 3

## STUDI E SPERIMENTAZIONI

---

Prima di passare alla parte in cui verrà descritta la sperimentazione presentata in questo elaborato, si procede ad illustrare alcuni lavori precedentemente svolti nel campo del comportamento dei materiali composti FRCM su substrato in calcestruzzo.

### **3.1 INVESTIGATION OF BOND BEHAVIOR OF PBO FIBER-REINFORCED CEMENTITIOUS MATRIX COMPOSITE-CONCRETE INTERFACE**

**L. H. SNEED, T. D'ANTINO, AND C. CARLONI**

#### *INTRODUZIONE*

Questo documento riporta i risultati di uno studio sperimentale condotto per capire il comportamento ed il meccanismo di trasferimento delle tensioni di composti a matrice cementizia fibrorinforzati (FRCM) applicati sulla superficie di un substrato in calcestruzzo, con lo scopo di rinforzo strutturale. Il composto FRCM è costituito da una rete in fibre di poliparafenilenebenzobisoxazolo (PBO) compreso tra due strati di malta cementizia modificata con polimeri. Sono state condotte delle prove di taglio diretto singole su campioni con strisce di composito applicate a prismi di calcestruzzo. I parametri variabili sono stati la lunghezza di applicazione e la larghezza del composito. In aggiunta, lo strato superiore della matrice è stato omesso in alcuni provini, per esaminare il comportamento dell'interfaccia fibre-matrice ed il ruolo della matrice nel trasferimento delle tensioni. Per indagare il meccanismo di trasferimento delle tensioni sono state eseguite delle misurazioni delle deformazioni su punti della lunghezza di applicazione. I risultati suggeriscono che la lunghezza efficace di applicazione di questo composto varia tra 250 e 330 mm. A differenza dei composti fibrorinforzati a base polimerica (FRP), la larghezza dell'applicazione non ha influito in termini di carico massimo applicato. Infine, il meccanismo di trasferimento delle tensioni all'interfaccia fibra-matrice dalle due parti della rete in fibra, si è rivelato diverso.

### SCOPO DELLA RICERCA

La progettazione di interventi con sistemi FRCM richiede una valutazione del comportamento del legame delle interfacce matrice-calcestruzzo e matrice-fibra. La seguente ricerca indaga gli effetti sulla trasmissione delle tensioni da parte di lunghezza e larghezza di applicazione dei composti PBO FRCM. Questo studio è necessario per lo sviluppo e la validazione di modelli per determinare la lunghezza efficace di applicazione, che può essere usata per stabilire la capacità portante dell'interfaccia. I risultati ottenuti fanno anche chiarezza sul comportamento tra matrice e fibre, mettendo in risalto il ruolo della matrice nel trasferimento delle tensioni.

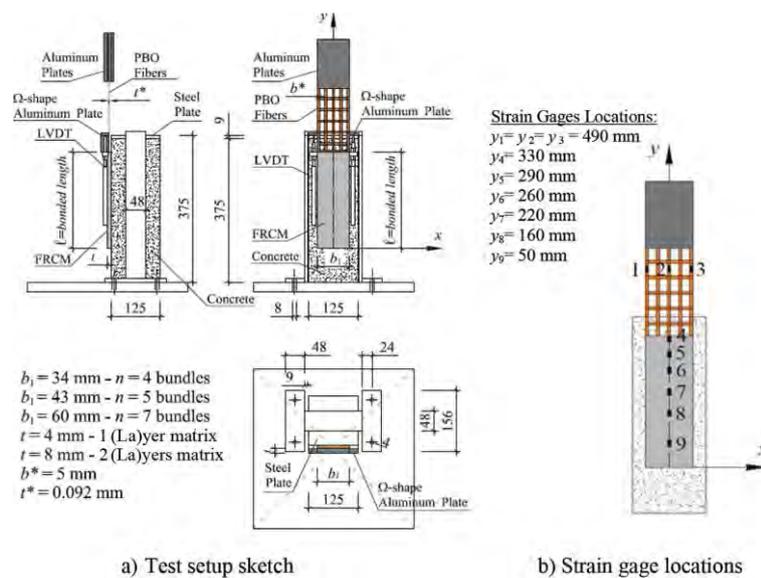


Fig. 3.1 – Setup della prova e montaggio.

### PROGRAMMA DELLA SPERIMENTAZIONE

#### Setup della prova

Il setup delle prove di taglio diretto, comunemente usato per studiare il comportamento del legame FRP-calcestruzzo, è stato adottato anche per questo studio. È stata adottata la classica configurazione push-pull, in cui il prisma di calcestruzzo viene trattenuto mentre le fibre vengono tirate (Fig. 3.1a e Fig. 3.2). Il prisma di calcestruzzo ha dimensioni in pianta di 125 x 125 mm ed altezza 375 mm. Il materiale composito è costituito da una rete in fibra PBO e malta cementizia modificata con polimeri. La rete in fibra PBO è costituita da fasci bidirezionali spazati di 10 e 20 mm dall'asse del fascio, nelle due direzioni. Il peso della rete è di 88 g/m<sup>2</sup>, di cui 70.2 g/m<sup>2</sup> in direzione longitudinale e 17.8 g/m<sup>2</sup> in direzione trasversale. La larghezza nominale  $b^*$  e lo spessore medio  $t^*$  di un fascio sono di 5 e 0.092 mm rispettivamente.

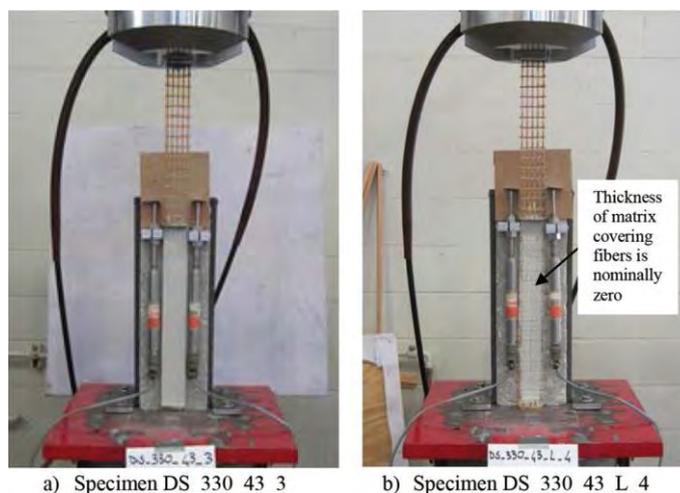


Fig. 3.2 – Foto della prova di taglio diretto.

Lo spazio libero tra i fasci è approssimativamente di 5 e 15 mm, rispettivamente in direzione longitudinale e trasversale. Tutti i fasci trasversali sono dalla stessa parte rispetto a quelli longitudinali, e la rete è legata da filamenti di fibra. La matrice è stata applicata solo nella zona di incollaggio per incorporare e legare le fibre del composito al prisma di calcestruzzo. La striscia di rete in fibra è stata lasciata nuda al di fuori della zona di incollaggio. All'estremità sono poi state incollate con resina epossidica delle piastre di alluminio, per permettere la presa da parte della macchina di prova (Fig. 3.1). Per strisce di larghezza superiore a 43 mm, le piastre di alluminio sono state serrate con quattro bulloni passanti, al fine di garantire una pressione omogenea e prevenire uno scivolamento all'interno delle piastre. Il prisma di calcestruzzo è stato vincolato mediante un telaio in acciaio imbullonato alla base della macchina di prova. E' stata interposta una piastra di acciaio tra il telaio e la testa del prisma per una distribuzione uniforme della pressione generata dalla reazione del telaio durante la prova. Le dimensioni del telaio sono mostrate in Fig. 3.1a. I test sono stati condotti con controllo di spostamento utilizzando una macchina di test universale. Lo spostamento globale, definito come spostamento relativo tra punti sui fasci di fibra immediatamente esterni alla matrice e la superficie adiacente del prisma di calcestruzzo, è stato incrementato con un tasso costante di 0.00084 mm/s fino alla rottura del provino. Lo spostamento globale è stato rilevato utilizzando due trasduttori di spostamento (LVDT), fissati alla superficie del calcestruzzo in prossimità del bordo della zona di incollaggio, reagenti contro una leggera piastra di alluminio sagomata ad Omega e fissata sulle fibre trasversali esterne, prossime alla zona di incollaggio, come mostrato in Fig. 3.1a e Fig. 3.2. Per controllare la velocità di spostamento è stata usata la media delle misurazioni dei due LVDT. Le dimensioni del prisma di calcestruzzo e del telaio di acciaio permettevano una lunghezza di applicazione massima pari a 330 mm. La scelta si è basata sui risultati degli studi di D'Ambrisi che, avendo testato a taglio doppio gli stessi materiali

dello stesso produttore, hanno dimostrato che la cosiddetta lunghezza efficace di incollaggio (discussa in una sezione successiva) per questi compositi è nell'intorno di 250 – 300 mm.

### Preparazione dei provini

Vengono presentati 58 test di taglio diretto per determinare le caratteristiche del legame ed il meccanismo di trasferimento delle tensioni nel composto FRCM. I parametri variabili sono la lunghezza e larghezza di incollaggio. La lunghezza varia da 100 a 330 mm, e la larghezza da 34 a 60 mm. La superficie del prisma di calcestruzzo è stata preventivamente sabbiata. E' stato applicato uno strato di 4 mm di matrice (strato interno) usando degli stampi per controllarne larghezza e spessore (Fig. 3.3a). E' stato applicato quindi un singolo strato di fibra PBO sullo strato di matrice, premendo delicatamente le fibre per assicurare una corretta impregnazione. Come riportato più avanti, per alcuni provini si è scelto di orientare i fasci longitudinali in modo che risultassero a diretto contatto con lo strato interno della matrice, mentre per altri lo strato interno è stato messo a diretto contatto con i fasci trasversali. E' stato registrato l'orientamento scelto per ogni provino. La striscia di rete in fibra è stata posizionata in modo che sporgesse leggermente dalla matrice nella parte inferiore del prisma di calcestruzzo, come mostrato in Fig. 3.3b. E' stato applicato un secondo strato di matrice (strato esterno) sulle fibre PBO per 42 dei 58 provini. Lo spessore degli strati di matrice rispetta le raccomandazioni del produttore. Fig. 3.2a mostra un provino con lo strato esterno della matrice presente, mentre la Fig. 3.2b mostra un provino che ne è privo. In quest'ultimo caso, lo spessore della matrice che ricopre le fibre è assunto pari a zero. Il composto è stato lasciato asciugare in condizioni ambiente per almeno una settimana prima dei test.

La Tab. 3.1 sintetizza le caratteristiche dei provini. I provini sono stati nominati con la notazione DS\_X\_Y (S e/o D e/o L) Z(T), dove X = lunghezza di incollaggio l, in mm; Y = larghezza di incollaggio b<sub>1</sub>, in mm; S indica la presenza di strain gauges sul provino; D indica che il provino è stato testato fino al mantenimento di un carico costante finale; L indica l'assenza dello strato esterno della matrice; Z = numero del provino. L'apice T dopo il numero del provino indica che i fasci trasversali della rete sono stati posizionati a contatto con lo strato interno della matrice. Il numero di fasci longitudinali n e lo spessore totale del composito t sono indicati in Tab. 3.1 per ogni provino.

Da notare che sono stati testati in totale 64 provini, ma solo 58 sono presenti in questo studio. Sei provini testati (da DS\_330\_34\_3 a 6, DS\_330\_43\_4, e DS\_330\_43\_S\_4) non compaiono nella Tab. 3.1 perché le fibre esterne all'area incollata si sono rotte prima di ottenere il processo di scorrimento. Come si dirà più avanti, il fenomeno è dovuto ad una non uniforme distribuzione

della forza tra i fasci che, in alcuni casi, ha comportato il raggiungimento della tensione di rottura per le fibre.

Come detto in precedenza, lo strato esterno della matrice non è stato applicato in 16 dei 58 provini per esaminare il comportamento dell'interfaccia fibre-matrice ed il ruolo della matrice nella distribuzione delle tensioni. 4 dei 16 provini senza lo strato esterno (DS\_330\_43\_L\_7T, 8T, e 9T; e DS\_330\_43\_L\_S\_1T) sono stati preparati con i fasci di fibre trasversali a contatto con lo strato interno della matrice. I rimanenti 12 invece sono stati preparati con i fasci longitudinali a contatto con lo strato interno della matrice. Questo metodo ha permesso di esaminare le potenziali differenze di comportamento dovute all'interruzione del legame tra i fasci longitudinali e la matrice.

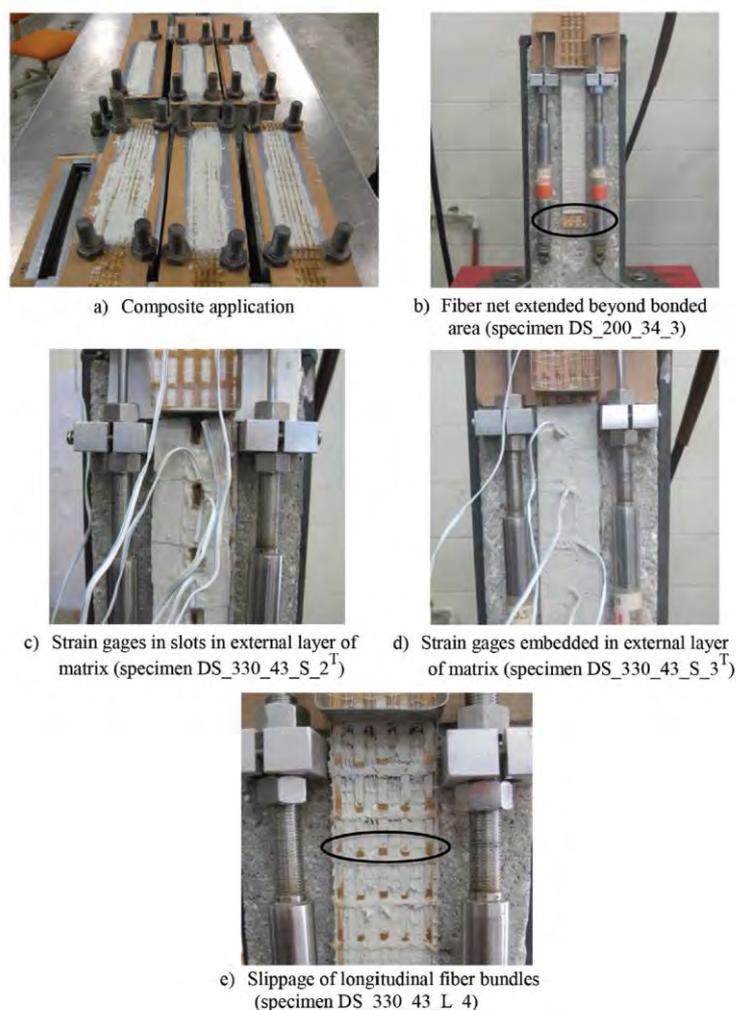


Fig. 3.3 – Foto dei campioni.

Sette provini inclusi nella Tab. 3.1 sono stati dotati di strain gauges (lunghezza 1 mm) per studiare la distribuzione degli spostamenti assiali lungo la lunghezza di incollaggio del composito.

Sono compresi provini con e senza lo strato di matrice esterno. Per quelli con lo strato esterno, sono state usate due tecniche per l'applicazione degli strain gauges alle fibre. Per due provini (DS\_330\_43\_S\_1<sup>T</sup> e DS\_330\_43\_S\_2<sup>T</sup>), sono stati creati degli appositi vani nello strato esterno in modo tale da poter applicare gli strain gauges sulle fibre a provino già ultimato (Fig. 3.3c). Questa procedura è simile a quella usata da D'Ambrosi. Alcune preoccupazioni sono sorte, però, per quanto riguarda la possibile concentrazione delle tensioni lungo i bordi dei vani. In aggiunta al fatto che la mancanza dello strato esterno di matrice, in corrispondenza degli strain gauges, potrebbe causare un diverso comportamento delle fibre. Questi interrogativi sorgono dal fatto che il ruolo dello strato esterno della matrice non è completamente chiaro. Pertanto, per DS\_330\_43\_S\_3<sup>T</sup>, DS\_330\_43\_S\_5, e DS\_330\_60\_S\_1, gli strain gauges sono stati applicati alle fibre prima di essere completamente ricoperti dallo strato esterno della matrice (Fig. 3.3d). Due provini privi dello strato esterno sono stati dotati di strain gauges (DS\_330\_43\_L\_S\_1<sup>T</sup> and DS\_330\_43\_L\_S\_2), applicati dopo la preparazione del provino. Le posizioni di applicazione sono mostrate in Fig. 3.1b. I sensori da 4 a 7 sono stati applicati sui fasci longitudinali della lunghezza incollata, mentre da 1 a 3 sono stati montati sulle fibre esterne alla matrice. Gli strain gauges 1 e 3 sono inclusi su DS\_330\_43\_S\_1<sup>T</sup> and DS\_330\_43\_S\_2<sup>T</sup>

### Proprietà dei materiali

I prismi sono stati prodotti con calcestruzzo a base di cemento Portland (Tipo 1) senza additivi. La dimensione massima dell'aggregato è di 9.5 mm. Sono stati confezionati sei cilindri 100 x 200 mm dallo stesso calcestruzzo usato per i prismi, al fine di determinare la resistenza a compressione e trazione secondo ASTM C39 e C496. Le proprietà del materiale sono riportate in Tab. 3.2. Durante la formazione della matrice sono stati confezionati dieci cilindri 50 x 100 mm al fine di determinare la resistenza a compressione e trazione secondo ASTM C39 e C496. Le proprietà del materiale sono riportate in Tab. 3.2. Sono stati effettuati dei test di trazione sulla rete in fibra per verificarne le caratteristiche ed avere conferma dell'efficacia del sistema di presa della macchina. Sono stati fatti 14 test di trazione su strisce di rete di diversa larghezza b2 per determinare la presenza di effetti dovuti alla larghezza del provino. Sono stati condotti dei test su strisce con 1, 4, 5 e 7 fasci longitudinali, con almeno tre campioni identici per tipo. Le prove si sono svolte in controllo di spostamento con una velocità di 1.25 mm/min, come da ASTM D3039. Sono stati applicati degli strain gauges su uno o più fasci centrali di otto provini per studiare la relazione carico-deformazione. I provini testati a trazione hanno la denominazione PBO\_X(S)\_Z, dove X = larghezza b2 della striscia di rete, in mm; S indica la presenza di strain gauges; Z = numero del provino. La Tab. 3.3 riassume le caratteristiche dei provini sottoposti a trazione, compreso il

numero di fasci longitudinali  $n$ , la larghezza  $b_2$  ed il carico massimo a rottura  $P^*$ . La Fig. 3.4<sup>a</sup> mostra un provino durante il test di trazione, mentre la Fig. 3.4b riporta le curve tensione-deformazione ottenute dai provini dotati di strain gauges. La tensione è ottenuta dividendo il carico applicato  $P$  per la sezione trasversale dei fasci longitudinali del provino ( $nb \cdot t^*$ ). Il grafico ed i risultati della Tab. 3.3 dimostrano che non vi è la presenza di effetti dovuti alla larghezza. La Tab. 3.2 riporta la resistenza a trazione, la deformazione massima ed il modulo elastico come media dei campioni testati. I valori delle suddette grandezze, ricavati dai test, sono abbastanza diversi da quelli dichiarati dal produttore (5800 MPa, 0.025 e 270 GPa rispettivamente). Gli autori attribuiscono queste differenze ad una diversa metodologia di test condotto dal produttore delle fibre, nei quali i fasci sono opportunamente intrecciati ed influenzano la resistenza a trazione ed il modulo elastico.

## ***RISULTATI SPERIMENTALI***

### **Modi di rottura, comportamento generale e carico massimo**

Per la maggior parte dei test di taglio diretto presenti in questo documento, la rottura è caratterizzata da un considerevole scorrimento tra le fibre e la matrice. In genere non si è riscontrato alcun danno all'interfaccia matrice-calcestruzzo, e lo scorrimento è avvenuto all'interfaccia matrice-fibra, eccetto per DS\_100\_34\_1<sup>T</sup> e DS\_100\_34\_2<sup>T</sup>. Gli autori credono che sia prevalso un meccanismo di rottura di primo modo a causa della ridotta lunghezza di incollaggio adottata. Dopo il raggiungimento del carico massimo, si osserva una graduale estrazione dei fasci longitudinali dalla matrice nella parte superiore, mentre nella parte inferiore si assiste ad un lento avanzare delle fibre verso l'interno della matrice (posizione  $y = 0$  in Fig. 3.1b). Per i provini privi dello strato esterno, lo scorrimento è chiaramente visibile, soprattutto se le fibre trasversali sono orientate verso la parte esterna, come mostrato in Fig. 3.3e. per i provini con entrambi gli strati della matrice, un comportamento simile è visibile solo dopo la rimozione dello strato esterno, a prova completata, dove è possibile osservare che i fasci trasversali non subiscono spostamento. Questo lascia intendere che il trasferimento delle tensioni avvenga prevalentemente tra i fasci di fibre verticali e la matrice.

Name	Composite width $b_1$ , mm (in.)	No. of bundles $n$	Composite length $l$ , mm (in.)	No. of matrix layers $L_a$	Composite thickness $t$ , mm (in.)	Maximum load $P^*$ , kN (k)	Ultimate stress $\sigma^*$ , MPa (ksi)
DS_100_34_1 <sup>T</sup>	34 (1.3)	4	100 (4)	2	8 (0.3)	1.92 (0.43)	1040 (151)
DS_100_34_2 <sup>T</sup>	34 (1.3)	4	100 (4)	2	8 (0.3)	0.97 (0.22)	530 (77)
DS_100_34_3 <sup>T</sup>	34 (1.3)	4	100 (4)	2	8 (0.3)	1.62 (0.36)	880 (128)
DS_150_34_1 <sup>T</sup>	34 (1.3)	4	150 (6)	2	8 (0.3)	2.22 (0.50)	1210 (175)
DS_150_34_2 <sup>T</sup>	34 (1.3)	4	150 (6)	2	8 (0.3)	1.55 (0.35)	840 (122)
DS_150_34_3 <sup>T</sup>	34 (1.3)	4	150 (6)	2	8 (0.3)	2.87 (0.65)	1560 (226)
DS_150_34_4 <sup>T</sup>	34 (1.3)	4	150 (6)	2	8 (0.3)	2.34 (0.53)	1270 (184)
DS_150_60_1	60 (2.4)	7	150 (6)	2	8 (0.3)	5.25 (1.18)	1630 (236)
DS_150_60_2	60 (2.4)	7	150 (6)	2	8 (0.3)	5.04 (1.13)	1570 (228)
DS_150_60_3	60 (2.4)	7	150 (6)	2	8 (0.3)	3.05 (0.69)	950 (138)
DS_200_34_1	34 (1.3)	4	200 (8)	2	8 (0.3)	3.05 (0.69)	1660 (241)
DS_200_34_2	34 (1.3)	4	200 (8)	2	8 (0.3)	2.52 (0.57)	1370 (199)
DS_200_34_3	34 (1.3)	4	200 (8)	2	8 (0.3)	3.44 (0.77)	1870 (271)
DS_250_34_1 <sup>T</sup>	34 (1.3)	4	250 (10)	2	8 (0.3)	2.61 (0.59)	1420 (206)
DS_250_34_2 <sup>T</sup>	34 (1.3)	4	250 (10)	2	8 (0.3)	2.11 (0.47)	1150 (167)
DS_250_34_3 <sup>T</sup>	34 (1.3)	4	250 (10)	2	8 (0.3)	2.82 (0.63)	1530 (222)
DS_330_34_1 <sup>T</sup>	34 (1.3)	4	330 (13)	2	8 (0.3)	3.00 (0.67)	1630 (236)
DS_330_34_2 <sup>T</sup>	34 (1.3)	4	330 (13)	2	8 (0.3)	3.51 (0.79)	1910 (277)
DS_330_34_7	34 (1.3)	4	330 (13)	2	8 (0.3)	4.07 (0.91)	2210 (321)
DS_330_34_8	34 (1.3)	4	330 (13)	2	8 (0.3)	4.02 (0.90)	2180 (316)
DS_330_34_9	34 (1.3)	4	330 (13)	2	8 (0.3)	3.44 (0.77)	1870 (271)
DS_330_43_1 <sup>T</sup>	43 (1.7)	5	330 (13)	2	8 (0.3)	4.43 (1.00)	1930 (280)
DS_330_43_2 <sup>T</sup>	43 (1.7)	5	330 (13)	2	8 (0.3)	5.25 (1.18)	2280 (331)
DS_330_43_3	43 (1.7)	5	330 (13)	2	8 (0.3)	5.27 (1.18)	2290 (332)
DS_330_43_5	43 (1.7)	5	330 (13)	2	8 (0.3)	4.79 (1.02)	2080 (302)
DS_330_43_6	43 (1.7)	5	330 (13)	2	8 (0.3)	5.09 (1.14)	2210 (321)
DS_330_43_S_1 <sup>T</sup>	43 (1.7)	5	330 (13)	2	8 (0.3)	4.48 (1.01)	1950 (283)
DS_330_43_S_2 <sup>T</sup>	43 (1.7)	5	330 (13)	2	8 (0.3)	5.12 (1.15)	2230 (323)
DS_330_43_S_3 <sup>T</sup>	43 (1.7)	5	330 (13)	2	8 (0.3)	3.03 (0.68)	1320 (191)
DS_330_43_S_5	43 (1.7)	5	330 (13)	2	8 (0.3)	4.03 (0.91)	1750 (254)
DS_330_43_L_1	43 (1.7)	5	330 (13)	1	4 (0.15)	4.96 (1.12)	2160 (313)
DS_330_43_L_2	43 (1.7)	5	330 (13)	1	4 (0.15)	4.63 (0.94)	2010 (292)
DS_330_43_L_3	43 (1.7)	5	330 (13)	1	4 (0.15)	4.61 (1.04)	2000 (290)
DS_330_43_L_4	43 (1.7)	5	330 (13)	1	4 (0.15)	3.98 (0.88)	1730 (251)
DS_330_43_L_5	43 (1.7)	5	330 (13)	1	4 (0.15)	3.96 (0.89)	1720 (249)
DS_330_43_L_6	43 (1.7)	5	330 (13)	1	4 (0.15)	3.82 (0.86)	1660 (241)
DS_330_43_L_7 <sup>T</sup>	43 (1.7)	5	330 (13)	1	4 (0.15)	2.67 (0.60)	1160 (168)
DS_330_43_L_8 <sup>T</sup>	43 (1.7)	5	330 (13)	1	4 (0.15)	3.67 (0.82)	1600 (232)
DS_330_43_L_9 <sup>T</sup>	43 (1.7)	5	330 (13)	1	4 (0.15)	3.09 (0.69)	1340 (194)
DS_330_43_L_10	43 (1.7)	5	330 (13)	1	4 (0.15)	4.45 (1.00)	1930 (280)
DS_330_43_L_11	43 (1.7)	5	330 (13)	1	4 (0.15)	4.72 (1.06)	2050 (297)
DS_330_43_L_S_1 <sup>T</sup>	43 (1.7)	5	330 (13)	1	4 (0.15)	3.24 (0.73)	1410 (205)
DS_330_43_L_S_2	43 (1.7)	5	330 (13)	1	4 (0.15)	4.69 (1.05)	2040 (296)
DS_330_60_1 <sup>T</sup>	60 (2.4)	7	330 (13)	2	8 (0.3)	7.05 (1.58)	2190 (318)
DS_330_60_2 <sup>T</sup>	60 (2.4)	7	330 (13)	2	8 (0.3)	6.56 (1.47)	2040 (296)
DS_330_60_3 <sup>T</sup>	60 (2.4)	7	330 (13)	2	8 (0.3)	6.06 (1.36)	1880 (273)
DS_330_60_4 <sup>T</sup>	60 (2.4)	7	330 (13)	2	8 (0.3)	6.50 (1.46)	2020 (293)
DS_330_60_5 <sup>T</sup>	60 (2.4)	7	330 (13)	2	8 (0.3)	6.28 (1.41)	1950 (283)
DS_330_60_6	60 (2.4)	7	330 (13)	2	8 (0.3)	7.01 (1.58)	2180 (316)
DS_330_60_D_1	60 (2.4)	7	330 (13)	2	8 (0.3)	8.29 (1.86)	2570 (373)
DS_330_60_D_2	60 (2.4)	7	330 (13)	2	8 (0.3)	7.12 (1.60)	2210 (321)
DS_330_60_D_3	60 (2.4)	7	330 (13)	2	8 (0.3)	6.56 (1.47)	2040 (296)
DS_330_60_D_4	60 (2.4)	7	330 (13)	2	8 (0.3)	5.24 (1.18)	1630 (236)
DS_330_60_D_5	60 (2.4)	7	330 (13)	2	8 (0.3)	6.69 (1.50)	2080 (302)
DS_330_60_S_1	60 (2.4)	7	330 (13)	2	8 (0.3)	6.30 (1.42)	1960 (284)
DS_330_60_L_1	60 (2.4)	7	330 (13)	1	4 (0.15)	5.80 (1.30)	1800 (261)
DS_330_60_L_2	60 (2.4)	7	330 (13)	1	4 (0.15)	5.49 (1.23)	1700 (247)
DS_330_60_L_3	60 (2.4)	7	330 (13)	1	4 (0.15)	6.60 (1.48)	2050 (297)

Tab. 3.1 - Risultati dei test condotti.

In molti test la rete esterna alla matrice, dal lato caricato del provino, ha presentato una non uniforme distribuzione del carico tra i fasci verticali, con un incremento dello spostamento. Questo è evidenziato da una rotazione rigida della piastra sagomata ad omega, così come da una

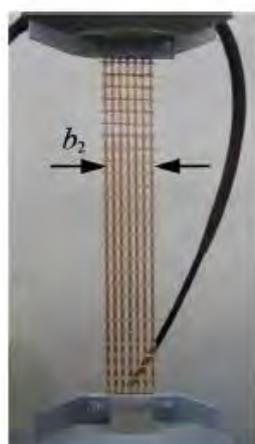
deformazione dei fasci trasversali esterni all'area di incollaggio, che risultavano ortogonali ai fasci longitudinali all'inizio del test. Il fenomeno visivo è poi confermato da una differenza nella misura dello spostamento da parte dei due LVDT, il che suggerisce che durante il test si sia verificata una redistribuzione delle tensioni. Poiché nelle prove di trazione delle fibre non si sono notati fenomeni dovuti al contributo della larghezza, si suppone che la non corretta distribuzione del carico nelle prove di taglio diretto sia dovuta a variazioni locali dell'aderenza dei fasci di fibre e forse ad una lieve eccentricità del carico. In sei provini, la non uniforme distribuzione della forza ha portato ad elevati livelli di tensione in uno o più fasci, tali da portare ad una rottura prematura dell'intera striscia esternamente all'area di incollaggio (da DS\_330\_34\_3 a \_6, DS\_330\_43\_4, e DS\_330\_43\_S\_4).

Concrete prism	
Compressive strength, MPa (psi)	42.5 (6160)
COV	0.013
Splitting tensile strength, MPa (psi)	3.4 (490)
COV	0.113
FRCM composite	
Matrix	
Compressive strength, MPa (psi)	27.9 (4050)
COV	0.009
Splitting tensile strength, MPa (psi)	3.6 (520)
COV	0.072
PBO fibers	
Tensile strength, MPa (ksi)	3015 (440)
COV	0.067
Ultimate strain	0.0145
COV	0.104
Elastic modulus, GPa (ksi)	206 (29,900)
COV	0.065

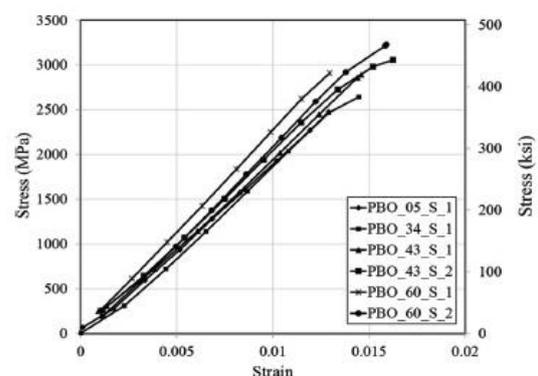
Tab. 3.2 – Proprietà dei materiali.

Name	$b_2$ , mm (in.)	$P^*$ , kN (kip)	$n$	$\sigma^* = P^*/nb^2t^*$ , MPa (ksi)
PBO_5_S_1	5 (0.20)	1.39 (0.312)	1	3020 (438)
PBO_5_S_2	5 (0.20)	1.41 (0.317)	1	3070 (445)
PBO_5_S_3	5 (0.20)	1.25 (0.281)	1	2720 (395)
PBO_34_1	34 (1.34)	5.52 (1.241)	4	3000 (435)
PBO_34_2	34 (1.34)	5.67 (1.275)	4	3080 (447)
PBO_34_3	34 (1.34)	5.41 (1.216)	4	2940 (426)
PBO_34_S_1	34 (1.34)	4.70 (1.057)	4	2550 (370)
PBO_43_1	43 (1.69)	6.82 (1.533)	5	2970 (431)
PBO_43_2	43 (1.69)	6.72 (1.511)	5	2920 (424)
PBO_43_S_1	43 (1.69)	7.35 (1.652)	5	3200 (464)
PBO_43_S_2	43 (1.69)	7.09 (1.594)	5	3080 (447)
PBO_60_1	60 (2.36)	10.65 (2.392)	7	3300 (479)
PBO_60_S_1	60 (2.36)	9.85 (2.214)	7	3060 (444)
PBO_60_S_2	60 (2.36)	10.65 (2.394)	7	3310 (480)

Tab. 3.3 – Campioni della prova a trazione.



a) Photo of tensile test (specimen PBO\_60\_1)



b) Stress-strain relation of PBO fibers

Fig. 3.4 - Prove di trazione

La rottura a trazione dei fasci longitudinali esterni alla matrice è caratterizzata da un rapido stiramento delle fibre senza incremento di carico. Questa modalità di rottura si manifesta improvvisamente poiché le prove di taglio diretto sono condotte in controllo di spostamento tra le fibre ed il substrato in calcestruzzo. Una volta verificatasi la rottura della fibra, lo spostamento dell'intero sistema si concentra nel punto di rottura, generando una condizione di carico instabile. Come per i test di trazione su fibra, non si osserva una rottura globale della rete. Il carico massimo  $P^*$  è espresso in Tab. 3.1 per ogni provino. La dispersione dei valori di  $P^*$  si può spiegare, in parte, con variazioni locali delle caratteristiche del legame d'interfaccia, che comportano una non uniforme distribuzione del carico tra i fasci, come detto in precedenza.

### **Fessure pre-esistenti**

Alcuni campioni hanno presentato fessure da ritiro sulla superficie esterna del composito, in particolare quelli dotati di strain gauges (Fig. 3.3c). Le crepe si sviluppano sulla lunghezza del provino con uno schema trasversale ed in tutti i casi non si estendono mai per tutta la larghezza del composito. Le fessure si aprono con l'aumentare dello scorrimento ed eventualmente penetrano nello spessore della matrice, come si nota osservando lateralmente il provino. La presenza delle fessure genera una discontinuità nella distribuzione delle tensioni tra fibra e matrice, con conseguente deformazione localizzata in corrispondenza delle crepe stesse. La presenza di fessure da ritiro è strettamente legata all'applicazione della matrice. In questo studio, ogni campagna di getti ha seguito le medesime procedure, ma non tutti i provini hanno presentato fessure da ritiro. Questo suggerisce che la matrice utilizzata è sensibile alla miscelazione ed alle modalità di applicazione.

### **Risposta carico-spostamento**

La Fig. 3.5a mostra la risposta carico  $P$ -spostamento di provini rappresentativi con diverse larghezze di incollaggio e medesima lunghezza ( $\ell = 330$  mm). Generalmente, una prima risposta lineare è seguita da una non lineare fino al valore massimo (picco) del carico applicato  $P^*$ . Durante la fase non lineare precedente al picco, si manifestano alcuni fenomeni all'interfaccia fibra-matrice. Una descrizione dettagliata del meccanismo di trasferimento interfacciale tra fibra e matrice nella fase non lineare sarà presentato in una futura pubblicazione. E' da notare tuttavia che l'inizio della fase non lineare si manifesta con un micro-danneggiamento della matrice vicino all'estremità caricata. Una volta che si verifica l'apertura delle micro fratture, inizia lo scivolamento delle fibre. Man mano che questo progredisce, il carico continua a salire per la presenza di attrito che è stato osservato nell'area di distacco tra filamenti di fibra e fibra-matrice, che contribuisce al

taglio interfacciale e, quindi, all'incremento del carico. La risposta discendente post picco ha un'inclinazione variabile ed indica che il trasferimento delle tensioni non è più completamente stabilito. Il solo contributo dell'attrito è chiaramente individuabile nella risposta dei provini DS\_330\_60\_D\_3 e DS\_330\_60\_D\_5, che diventa costante per valori dello spostamento globale maggiori di circa 9 mm. Per i campioni con fessure da ritiro precedenti ai test, sono stati osservati dei bruschi cali nelle risposte di carico quando le fessure hanno iniziato a propagarsi verso i bordi longitudinali del composito. Comparando i risultati di provini con e senza fessure preesistenti, si è visto che il comportamento generale dei campioni sembra non essere affetto dalla presenza delle suddette fessure. La Fig. 3.5b mostra la risposta di carico dei provini con strain gauges della serie DS\_330\_43. I campioni DS\_330\_43\_1T and DS\_330\_43\_5 vengono inseriti come paragone. In genere il carico massimo per i provini con strain gauges è paragonabile a provini simili sprovvisti di strumentazione. Per DS\_330\_43\_S\_1T e DS\_330\_43\_S\_2T, tuttavia, la fase non lineare pre picco appare più accentuata. E' possibile che per questi due provini, i vani creati per l'installazione degli strain gauges abbiano indotto una concentrazione degli sforzi in prossimità dei vani stessi, o modificato l'azione vincolante della matrice sulla fibra, evidenziando la necessità di studiare il ruolo dello strato esterno della matrice. I provini DS\_330\_43\_S\_3T e DS\_330\_43\_S\_5 con strain gauges immersi nella matrice mostrano un comportamento simile a DS\_330\_43\_1T and DS\_330\_43\_5, che ne sono sprovvisti.

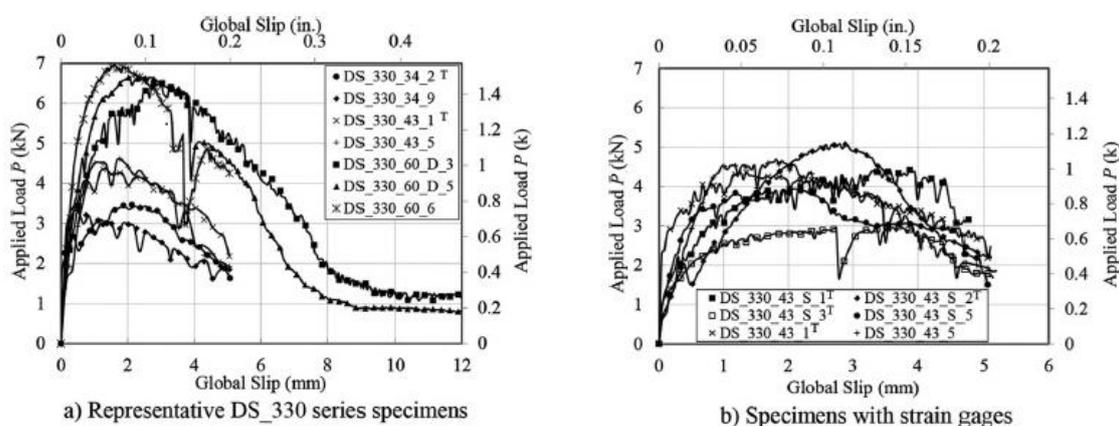


Fig. 3.5 – Risposta di carico applicato  $P$  – scorrimento globale dei provini rappresentativi.

La Fig. 3.6 mostra la risposta di campioni rappresentativi della serie DS\_XXX\_34 con differente lunghezza di incollaggio e medesima larghezza ( $b_1 = 34$  mm). La figura mostra una sovrapposizione iniziale del tratto lineare, con una curva più alta per provini con maggiore lunghezza di incollaggio. Il confronto dei grafici suggerisce che per carichi ridotti, il trasferimento degli sforzi di taglio e lo scorrimento si sviluppino vicino all'estremità caricata del composito; incrementando il carico, essi si propagano verso l'estremità non caricata. Da notare che nei legami

FRP-calcestruzzo con lunghezza di incollaggio superiore ad un certo valore critico (denominato lunghezza efficace di incollaggio), si osserva una zona con incremento di spostamento a carico costante, quando questo raggiunge il cosiddetto carico di distacco, con la propagazione dello scorrimento verso l'estremità non caricata del composito. Nel caso dei provini FRCM in Fig. 3.5a e Fig. 3.6, con lunghezza di incollaggio  $\ell = 330$  mm, non si nota una zona a carico costante, poiché l'attrito tra le fibre distaccate e la matrice genera un'alterazione della risposta, come detto in precedenza. Ulteriori discussioni sulla lunghezza efficace di incollaggio sono presenti nelle sezioni successive. La Fig. 3.7 mostra la risposta di campioni privi dello strato esterno della matrice (serie DS\_330\_XX\_L). Le Fig. 3.7a e Fig. 3.7b mostrano la risposta di provini con larghezza di incollaggio di 43 mm, con i fasci longitudinali della rete disposti a contatto con lo strato interno della matrice. La Fig. 3.7a, che include anche la risposta del DS\_330\_43\_5 come riferimento, mostra che la forma del diagramma di risposta non cambia senza la presenza dello strato esterno della matrice. Allo stesso modo, la Fig. 3.7c mostra che la risposta dei provini con larghezza di incollaggio di 60 mm senza lo strato esterno è simile a quella del DS\_330\_60\_6 con entrambi gli strati, inserito nel grafico come termine di paragone. Questo suggerisce che la natura del meccanismo di trasferimento delle tensioni si sia mantenuta. La Fig. 3.7d mostra la risposta di provini con larghezza di incollaggio di 43 mm, privi dello strato esterno della matrice e con i fasci trasversali delle fibre a contatto con lo strato interno. Un confronto tra Fig. 3.7a e Fig. 3.7d indica che i campioni con le fibre trasversali a contatto con lo strato interno della matrice presentano un carico massimo ed una rigidezza inferiori.

### Deformazioni misurate

La deformazione assiale  $\epsilon_{yy}$  è stata misurata lungo i fasci centrale e laterali mediante strain gauges nelle posizioni 1, 2 e 3, esterni all'area di incollaggio (Fig. 3.1b), nei provini DS\_330\_43\_S\_1<sup>T</sup> and DS\_330\_43\_S\_2<sup>T</sup>, per monitorare la ripartizione del carico durante i test. I valori di deformazione misurati non si sono rivelati uniformi tra i fasci strumentati, con crescite differenziate durante l'applicazione del carico. Un fenomeno simile si osserva negli FRP su calcestruzzo ed è attribuibile parzialmente alle variazioni locali delle proprietà dell'interfaccia. Nel caso di fasci di fibre, come nell'oggetto di questo studio, il fenomeno appare più marcato. Questo comportamento è visibile ad un'osservazione diretta, associandosi a fenomeni di scorrimento che si manifestano prima di raggiungere il carico massimo.

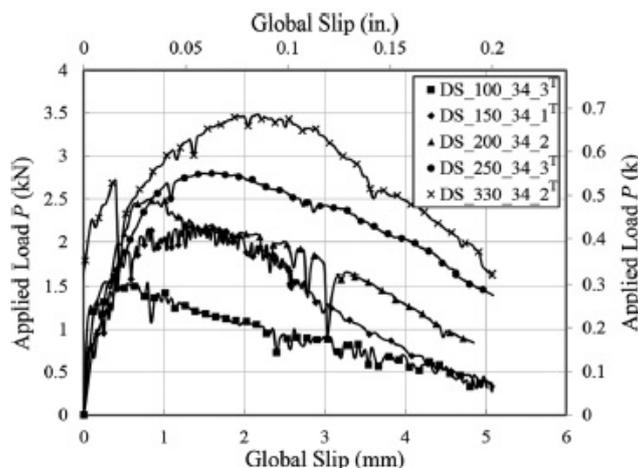


Fig. 3.6 – Risposta di carico applicato  $P$ -scorrimento globale per i provini DS\_XXX\_34.

La variazione della deformazione assiale  $\varepsilon_{yy}$  nel DS\_330\_60\_S\_1 misurata in punti diversi delle fibre longitudinali, per diversi valori del carico applicato  $P$ , è visibile in Fig. 3.8a. I valori di  $y$  corrispondono alla posizione di rilevamento lungo la lunghezza di incollaggio, definiti secondo l'asse in Fig. 3.1b. Nella Fig. 3.8b sono stati considerati sette valori di carico, corrispondenti ad altrettanti punti della curva di risposta (A1, B1, C1, D1, E1, F1, G1). La deformazione associata al valore del carico massimo  $P^*$  è di circa  $9300 \mu\epsilon$ , corrispondente a circa il 64 % della media della deformazione ultima ottenuta dalle prove a trazione. La stessa analisi è stata svolta per gli altri provini dotati di strain gauges (omettendo quelli senza lo strato esterno della matrice), ottenendo risultati simili. La deformazione media associata a  $P^*$  è risultata  $9800 \mu\epsilon$ , corrispondente a circa il 68 % della media della deformazione ultima ottenuta dalle prove a trazione. Per alcuni provini l'andamento delle deformazioni mostra delle lievi fluttuazioni nei gauges 4 e 5 (i più vicini al lato caricato della matrice) in corrispondenza del carico di picco, probabilmente dovute alle condizioni di aderenza locali delle fibre ed all'allineamento con la direzione del carico applicato. Per questi gauges sono stati rilevati anche degli aumenti improvvisi delle deformazioni dopo uno scorrimento considerevole. Questo può essere dovuto all'effetto vincolante dello strato esterno della matrice; nonostante le dimensioni contenute dei gauges, non appena le fibre iniziano a scorrere, l'interazione meccanica del contatto con la matrice induce un incremento di tensione di taglio all'interfaccia fibra-gauge, che può dar luogo a distacco del gauge dalla fibra. E' da notare che il contenuto numero di punti di misurazione delle deformazioni lungo la matrice potrebbe dar luogo ad un'interpretazione non corretta delle letture. Sono previste ulteriori misurazioni in futuri test per verificare i profili delle deformazioni e determinare se sia possibile adattare una legge coesiva del materiale, usata per l'interfaccia FRP-calcestruzzo, per descrivere il comportamento dell'interfaccia matrice-fibre negli FRCM.

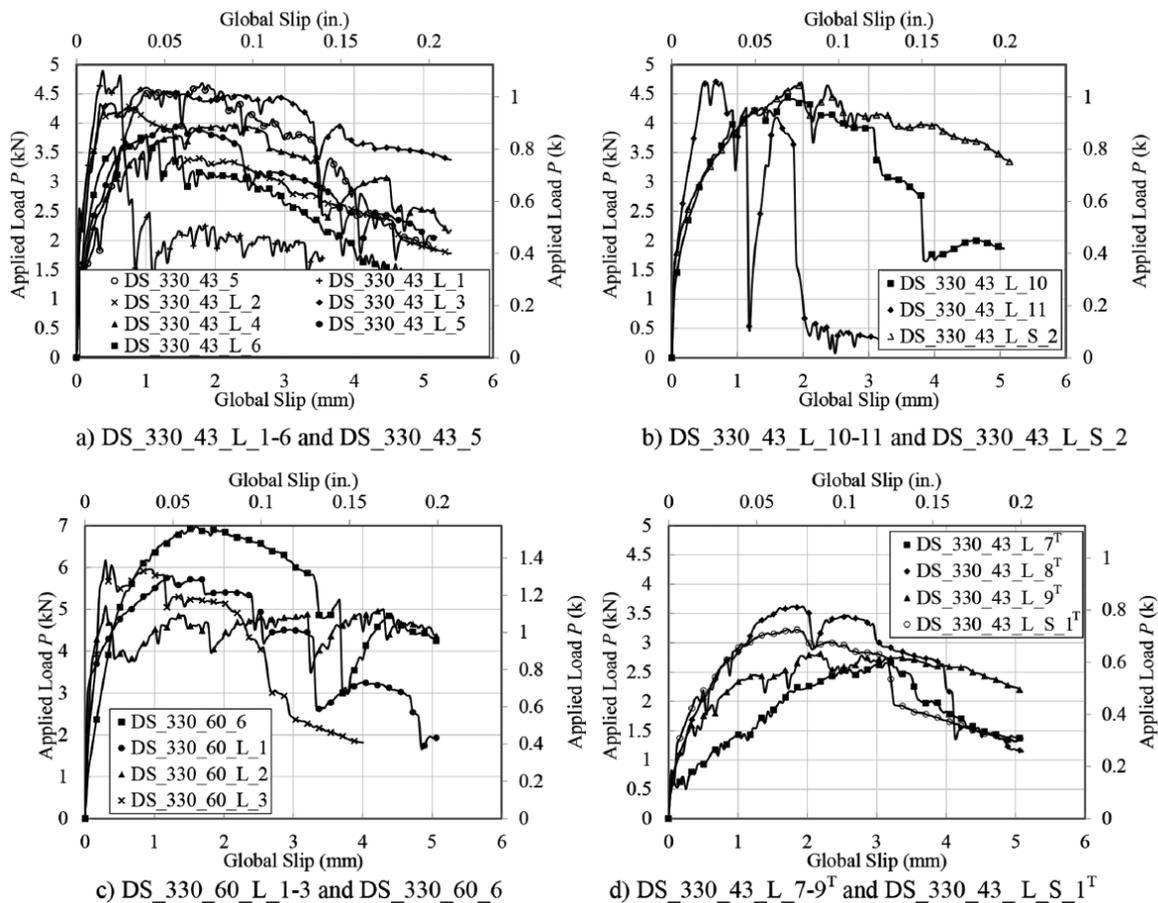


Fig. 3.7 – Risposta di carico applicato  $P$  – scorrimento globale per i provini senza lo strato di matrice superficiale.

**DISCUSSIONE**

Viene ora introdotta la tensione massima nell’Eq. 1 per studiare l’influenza di lunghezza di incollaggio, larghezza e condizioni dell’interfaccia:

$$\sigma^* = \frac{P^*}{nb^*t^*} \quad (1)$$

E’ stata scelta l’area nominale dei fasci di fibre longitudinali per normalizzare il carico massimo, poiché questo viene trasferito dalle fibre alla matrice attraverso l’interfaccia critica. Questo parametro viene inoltre usato per confrontare test di trazione di provini con diverse larghezze (Tab. 3.3).

**Influenza della lunghezza di incollaggio**

I provini utilizzati per studiare la relazione tra lunghezza di incollaggio  $\ell$  e capacità di carico in termini di tensione  $\sigma^*$  hanno larghezza del composito  $b_1$  pari a 34 mm o 60 mm, denominati serie DS\_XXX\_34 e serie DS\_XXX\_60 rispettivamente. La Fig. 9a mostra la relazione tra  $\sigma^*$  ed  $\ell$  per

le due serie, escludendo i relativi provini privi dello strato esterno della matrice. Si osserva un andamento crescente per entrambe le serie, indicando che la relazione vale per larghezze diverse. Vengono evidenziati a tratto pieno nel grafico i valori medi di  $\sigma^*$  calcolati sui dati ottenuti per ogni categoria di lunghezza. La Fig. 3.9a mostra che la tensione massima aumenta con l'incremento della lunghezza, ad un tasso decrescente. La relazione è coerente con i recenti studi in letteratura sui composti PBO FRCM, basati su provini sottoposti a prova di taglio doppio. Nel caso di legami FRP-calcestruzzo, la relazione tra  $\sigma^*$  ed  $\ell$  può essere usata per determinare la lunghezza efficace di incollaggio, indicata come  $\ell_{eff}$ , intesa come la lunghezza oltre la quale la tensione massima rimane costante. Il carico massimo associato a lunghezze di incollaggio maggiori o uguali a  $\ell_{eff}$  è il carico di distacco, detto anche capacità di carico. Nel caso di composti FRCM analizzati in questo studio, la presenza di attrito tra fibre e matrice dopo l'innesco dello scorrimento, dovrebbe portare ad un aumento del carico applicato dopo che il meccanismo si è completamente stabilito. Pertanto, il carico massimo  $P^*$  dovrebbe essere maggiore del carico di distacco nei casi in cui la lunghezza di incollaggio sia maggiore della lunghezza efficace, necessaria per stabilire completamente il meccanismo di vincolo. Come risultato, non dovrebbe esserci un plateau nella relazione  $\sigma^* - \ell$  nei legami FRCM-calcestruzzo. I profili della deformazione assiale  $\varepsilon_{yy}$  relativi alla lunghezza di incollaggio possono far luce sulla lunghezza efficace ed il carico corrispondente per questo composito. I profili delle deformazioni in Fig. 3.8a assomigliano a quelli ottenuti con test simili in legami FRP-calcestruzzo. In quel caso i profili delle deformazioni longitudinali possono essere usati per determinare  $\ell_{eff}$ . Infatti la zona di trasferimento della tensione (STZ), dove si osservano gradienti di deformazione, è completamente sviluppata all'inizio dello scorrimento per provini con una lunghezza di incollaggio maggiore di  $\ell_{eff}$ . La lunghezza di STZ pienamente sviluppata, coincide con la lunghezza efficace di incollaggio  $\ell_{eff}$ . I profili delle deformazioni in Fig. 3.8a suggeriscono che tale approccio può essere usato per identificare  $\ell_{eff}$  nei composti FRCM, nonostante la presenza di attrito durante lo scorrimento complichino l'analisi. I profili longitudinali ottenuti dal numero limitato di provini con strain gauges, suggeriscono che la lunghezza efficace è compresa tra 250 mm e 330 mm.

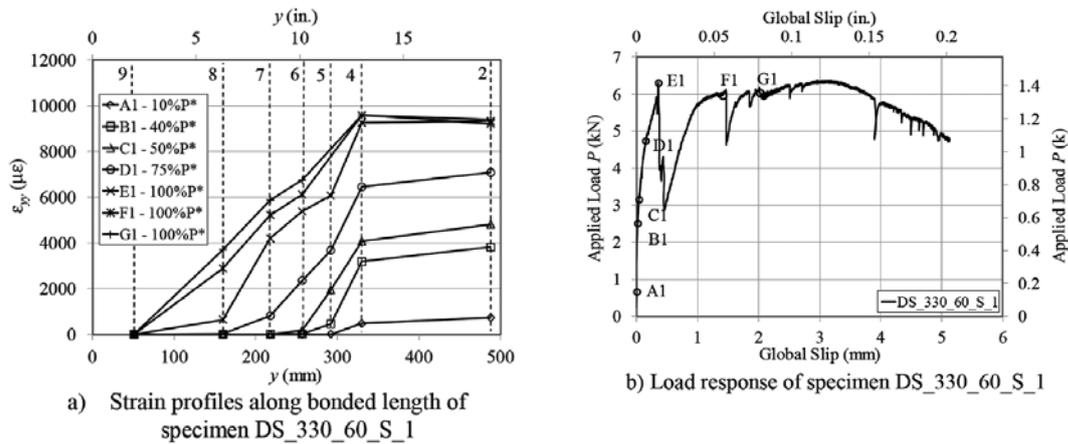


Fig. 3.8 – Analisi deformativa lungo la zona e risposta di carico-spostamento del campione DS\_330\_60\_S\_1

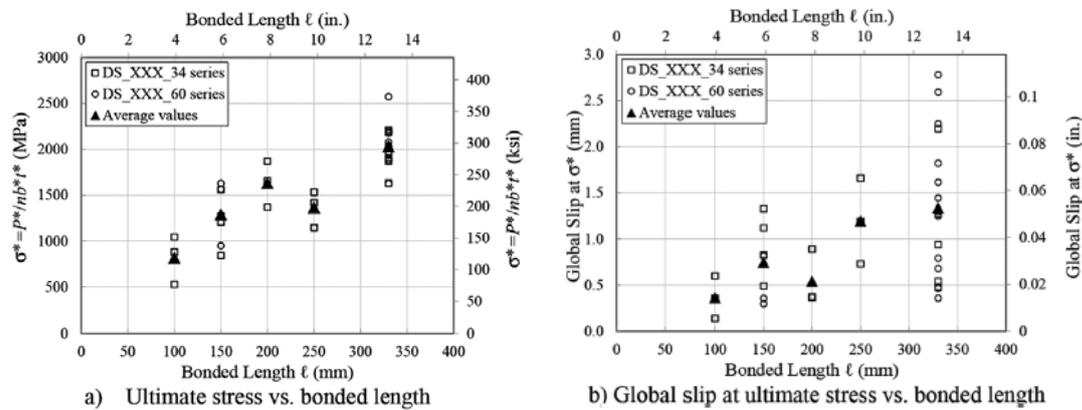


Fig. 3.9 – Tensione ultima e scorrimento globale confrontato alla lunghezza di aderenza per i campioni delle serie DS\_XXX\_60 e DS\_XXX\_34.

Infatti per tutti i provini dotati di strain gauges, il numero 9 posizionato in prossimità della zona non caricata (Fig. 3.1b) non ha registrato deformazioni significative in corrispondenza di P\*; si deduce che il meccanismo di trasferimento delle tensioni si è sviluppato completamente all'interno di un'area di lunghezza inferiore a 330 mm.

Per confronto, la lunghezza efficace di incollaggio per l'interfaccia FRP-calcestruzzo può essere calcolata mediante la formula fornita da ACI 440.2R, mostrata in Eq.2

$$l_{eff}^{FRP} = \sqrt{\frac{n_f t_f E_f}{\sqrt{f_c'}}} \quad (2)$$

dove  $n_f$  è il numero di strati di rinforzo di FRP;  $t_f$  è lo spessore nominale di uno strato;  $E_f$  è il modulo elastico a trazione;  $f_c'$  è la resistenza a compressione specifica del substrato di calcestruzzo. Usando questa formula per i composti PBO FRCM di questo studio, la lunghezza

efficace calcolata risulta sottostimata rispetto ai risultati sperimentali. Una ragione possibile è il diverso meccanismo di rottura del legame FRP-calcestruzzo ed FRCM-calcestruzzo.

La Fig. 3.9b mostra la relazione tra lo spostamento globale in corrispondenza di  $\sigma^*$  e la lunghezza di incollaggio  $\ell$ , comprendendo entrambe le serie ed escludendo i campioni a singolo strato di matrice. Se si assume come trascurabile lo spostamento della matrice rispetto al calcestruzzo, lo spostamento globale misurato è da imputare allo spostamento relativo delle fibre rispetto al prisma di calcestruzzo, all'inizio dell'area di incollaggio, fino al verificarsi dello scorrimento. Si nota una tendenza all'incremento dello spostamento globale con l'aumentare della lunghezza di incollaggio, ma la relazione non è chiara. Come detto in precedenza, la misura dello spostamento è sensibile alla presenza ed apertura di fessure pre-esistenti nella matrice, causando improvvise fluttuazioni dei dati. Per questo motivo, i valori dello spostamento sono riportati qualitativamente.

### Influenza della larghezza di incollaggio

La Fig. 3.10 mostra la relazione tra la tensione massima  $\sigma^*$  e larghezza di incollaggio del composito  $b_1$  per provini della medesima lunghezza ( $\ell = 330$  mm), appartenenti alla serie DS\_330. Nel grafico non compaiono i provini a singolo strato di matrice. Sono mostrate tre diverse larghezze di incollaggio, 34, 43 e 60 mm.

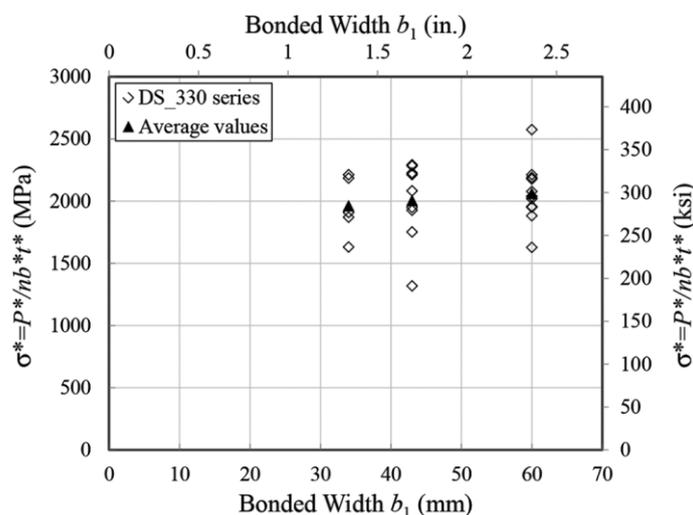


Fig. 3.10 – Tensione ultima confrontata con la larghezza di aderenza per  $i$

I dati in figura mostrano una notevole dispersione per larghezze ridotte. Questo potrebbe essere causato da una limitata possibilità di redistribuzione delle tensioni tra un numero di fasci longitudinali della rete inferiore ad un certo numero critico. Si nota inoltre che non vi è presenza di fenomeni dovuti alla larghezza, a differenza dei composti FRP. Il fenomeno è spiegabile

analizzando le differenze tra i composti FRP ed FRCM, rispettivamente con una distribuzione continua delle fibre per tutta la larghezza o con una distribuzione discreta a fasci, nonché per la diversa composizione della matrice.

### **Influenza dell'orientamento dei fasci trasversali e dello strato esterno della matrice**

Come detto in precedenza, per i composti PBO FRCM l'interfaccia critica studiata è quella tra fibra e matrice. Il taglio interfacciale si trasferisce dalle fibre interne alla matrice circostante, e ricerche recenti hanno supposto che lo sforzo di taglio trasmesso alle due superfici dell'interfaccia, da ciascun lato delle fibre della rete, sia approssimativamente lo stesso. Per provare questa ipotesi, sono state confrontate le tensioni massime  $\sigma^*$  di provini con lunghezza di incollaggio di 330 mm con diverse caratteristiche dell'interfaccia fibra-matrice. Innanzitutto è stato fatto un paragone in termini di media di tensione massima  $\sigma^*$  dei provini con entrambi gli strati di matrice, compresi quelli con gli strain gauges, variando solamente l'orientamento interno dei fasci trasversali della rete. Il valore medio di  $\sigma^*$  per i provini con fibre longitudinali a contatto con lo strato interno è risultato di 2084 MPa, mentre quelli con fibre trasversali a contatto con lo strato interno hanno fatto registrare 1944 MPa, il 7 % inferiore. Il risultato suggerisce che, nel caso di doppio strato di matrice, l'orientamento delle fibre interne non è significativo. Dei test addizionali saranno eseguiti appositamente per approfondire questo aspetto. Successivamente sono state confrontate le medie delle tensioni massime registrate dai provini senza lo strato esterno della matrice, con variazione dell'orientamento dei fasci. I provini con fibre longitudinali a contatto con la matrice hanno ottenuto un valore medio di 1904 MPa, mentre quelli con le fibre trasversali a contatto con la matrice hanno ottenuto il valore di 1378 MPa, il 28% inferiore. Come detto in precedenza, la risposta carico-spostamento per provini mono-strato con fibre trasversali orientate verso l'interno, mostrata in Fig. 3.7d, evidenzia carichi di picco inferiori, così come la rigidità, rispetto ad un opposto orientamento delle fibre, come mostrato in Fig. 3.7a e b la risposta è diversa poiché il trasferimento delle tensioni avviene principalmente tra matrice e fibre longitudinali. Quando vengono interposte le fibre trasversali contro lo strato interno della matrice, si interrompe la continuità del legame con i fasci longitudinali.

Il valore medio di  $\sigma^*$  per tutti i provini a doppio strato di lunghezza 330 mm è risultato di 2022 MPa. Quelli privi di strato esterno, con i fasci longitudinali orientati verso lo strato interno, presentano una riduzione di  $\sigma^*$  del 6 %. Questa lieve riduzione può essere dovuta ad una riduzione della superficie di aderenza tra fibra e matrice, mancando lo strato esterno. Cosa più importante, osservando il valore della riduzione, è che il meccanismo di trasferimento delle tensioni non è uguale per entrambe le superfici. Questi risultati combinati suggeriscono che il

trasferimento del taglio interfacciale è molto complesso per i composti FRCM e si rende necessario un ulteriore studio per comprendere meglio l'importanza dei diversi parametri delle superfici. Gli autori stanno attualmente sviluppando uno studio improntato sull'approccio della meccanica della frattura per indagare il ruolo dello strato esterno della matrice.

### ***LAVORI FUTURI***

Modelli che rappresentino il comportamento interfacciale tra matrice e fibra sono necessari per determinare con accuratezza la capacità di carico dei composti FRCM per applicazioni di rinforzo strutturale. E' necessaria una ulteriore ricerca per capire se la modalità di prova influenza i risultati. Inoltre sarebbe opportuno testare campioni con lunghezze di incollaggio superiori. Ulteriori analisi della distribuzione delle deformazioni aiuteranno a determinare se un approccio della meccanica della frattura, simile a quello usato per l'interfaccia FRP-calcestruzzo, può essere impiegato per descrivere il meccanismo di trasferimento delle tensioni nell'interfaccia matrice-fibra. Se si può utilizzare una legge di materiale coesivo, sarà importante indagare il ruolo di una maglia discreta di fasci ed il diverso spessore della matrice tra composti FRP ed FRCM. Infine, i test descritti in questo studio sono stati condotti ad una velocità di spostamento contenuta. Dei test aggiuntivi con velocità maggiori o cicli di carico sarebbero opportuni per esaminare la sensibilità dell'interfaccia FRCM-calcestruzzo a diverse condizioni di carico.

### ***CONCLUSIONI***

Questo documento descrive i risultati di una ricerca sperimentale condotta per studiare il comportamento ed il meccanismo di trasmissione delle tensioni di composti FRCM applicati esternamente ad un substrato di calcestruzzo. Sono stati effettuati test di trazione monoassiale su campioni di rete in fibra, con diverse larghezze. Sono state condotte prove di taglio diretto su provini con strisce di composito incollate a blocchi di calcestruzzo. I parametri variabili sono stati la lunghezza e la larghezza di incollaggio. In base ai risultati di questo studio, si possono trarre le seguenti conclusioni:

- Il distacco avviene all'interfaccia fibra-matrice invece che all'interfaccia matrice-calcestruzzo;
- La distribuzione assiale delle deformazioni lungo la lunghezza di incollaggio è simile a quella tipica dei composti FRP applicati su calcestruzzo, ed indica che la lunghezza efficace di incollaggio è compresa tra 250 e 330 mm. La deformazione massima corrispondente al massimo carico è in media di 9800  $\mu\epsilon$ , approssimativamente il 68 % della deformazione massima della rete in fibra;
- A differenza dei legami FRP-calcestruzzo, non si osservano effetti dovuti alla larghezza nei composti FRCM su calcestruzzo. Questo potrebbe essere dovuto ad un'azione indipendente dei fasci longitudinali;
- Il valore medio della tensione massima per provini senza lo strato esterno della matrice, con le fibre longitudinali a contatto con lo strato interno, è risultato il 6 % inferiore rispetto a quello di provini della stessa lunghezza con entrambi gli strati. Questo risultato indica che il trasferimento delle tensioni dai due lati della rete in fibre non è uguale.

### **3.2 EXPERIMENTAL ANALYSIS OF THE BOND BEHAVIOR OF GLASS, CARBON, AND STEEL FRCM COMPOSITES**

**T. D'ANTINO, C. PELLEGRINO, C. CARLONI, L. H. SNEED, G. GIACOMIN. [7]**

#### ***INTRODUZIONE***

In questo documento sono presentati e discussi i risultati di una sperimentazione condotta su accoppiamenti FRCM-calcestruzzo. I composti FRCM analizzati erano costituiti da diverse combinazioni di matrici cementizie modificate con polimeri e fibre ad alta resistenza formate da carbonio e fibre di vetro. È stato proposto, inoltre, un confronto con i risultati dei composti FRCM con fibre in acciaio, destinati ad essere utilizzati su supporti in calcestruzzo. Sono state effettuate ventiquattro prove di taglio diretto su provini FRCM-calcestruzzo con lo stesso materiale composito applicato in ugual larghezza e due lunghezze di incollaggio diverse. Questa ricerca contribuisce alla comprensione del complesso meccanismo di trasferimento delle tensioni fra composito FRCM ed il substrato, che è di fondamentale importanza per l'efficacia dei rinforzi con FRCM.

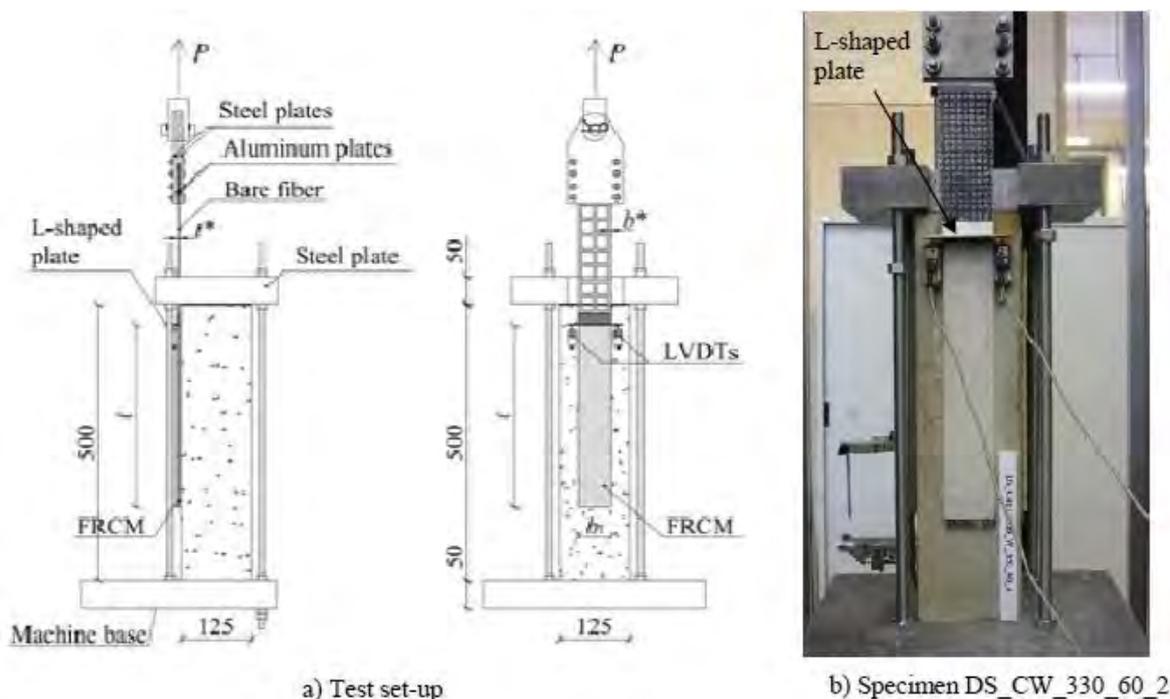


Fig. 3.11 – Set-up per la prova di taglio diretto; b) Foto del campione DS\_CW\_330\_60\_2.

### SET UP DELLE PROVE

Il materiale composito FRCM è stato applicato sulla superficie di un blocco di calcestruzzo, di forma prismatica, avente base 125 x 125 mm ed altezza 500 mm. L'applicazione è stata effettuata su una delle tre facce del prisma gettate contro il cassero, e la superficie non è stata trattata prima dell'applicazione. La fascia di composito ha una larghezza  $b_1$  pari a 60 mm e una lunghezza  $l$  pari a 330 o 450 mm. È stata adottata la configurazione *push-pull* mediante la quale le fibre sono state tirate mentre il prisma di calcestruzzo veniva trattenuto. La matrice è stata applicata al prisma di calcestruzzo alla distanza di 30 mm dal bordo superiore. Le fibre sono state incorporate nella matrice per una lunghezza pari ad  $l$  e sono state lasciate a vista al di fuori della lunghezza di applicazione del composito. Due piastre di alluminio di larghezza  $b_1$  e lunghezza 60 mm sono state applicate al termine delle fibre a vista utilizzando una resina epossidica termoindurente per migliorare la presa della macchina di prova. Sono state utilizzate due piastre di acciaio collegate alla testa della macchina per bloccare le piastrelle di alluminio. Le piastre di acciaio sono state serrate reciprocamente mediante otto bulloni passanti, e collegate alla macchina mediante un giunto a cerniera, Fig. 3.11. Le prove sono state condotte in controllo di velocità ad un valore di 0.005 mm/s. Due LVDT sono stati montati sul prisma di calcestruzzo vicino all'estremità caricata del composito per misurare lo spostamento delle fibre rispetto al supporto. Gli LVDT reagiscono contro una piastra angolare in alluminio incollato alle fibre a vista appena al di

fuori del composito, Fig. 3.11. In questo documento lo spostamento medio dei due LVDT è denominato spostamento globale “g”, mentre il carico applicato è chiamato P.

### PROPRIETÀ DEI MATERIALI

I prismi sono stati confezionati con calcestruzzo a base di cemento Portland (Tipo 1) senza additivi. Dallo stesso getto di calcestruzzo sono stati ricavati sei cubi da 150 mm per determinare la resistenza media a compressione secondo la norma UNI EN 12390-3. La resistenza cubica media calcolata è pari a  $R_{cm} = 59,3$  MPa (CoV = 0.150). Sono state utilizzate due matrici con diverse caratteristiche di resistenza meccanica ed aderenza. Dallo stesso getto usato per preparare i provini, sono stati confezionati tre prismi di dimensioni 40×40×160 mm per ogni matrice usata, e sono stati testati secondo la norma UNI EN 1015-11. La resistenza media alla compressione  $r_{cm}$  e la resistenza media alla flessione  $f_{flex,m}$  per ogni tipo di matrice, sono riportate nella Tab. 3.4.

Matrix	$r_{cm}$ [MPa] (CoV)	$f_{flex,m}$ [MPa] (CoV)
W	47.6 (0.040)	6.4 (0.009)
S	35.5 (0.011)	6.1 (0.077)

Tab. 3.4 – Proprietà meccaniche della matrice utilizzata.

Sono stati impiegati tre diversi tipi di fibre: vetro, carbonio e acciaio. Le fibre di carbonio e le fibre di vetro erano disposte in direzione longitudinale e trasversale in forma di rete. Le fibre di acciaio erano costituite solamente da 5 fasci di filamenti longitudinali con superficie nominale pari a 24 mm<sup>2</sup>/m. Ogni tipo di fibra è stato testato a trazione per determinare la resistenza  $\sigma^* = P^* / (nb \cdot t^*)$ , dove  $P^*$  è il carico di picco applicato misurato durante la prova,  $n$  è il numero di fasci di fibre longitudinali all'interno del composito,  $b^*$  è la larghezza del fascio e  $t^*$  è lo spessore di un unico fascio. Sono stati testati almeno due campioni con la stessa larghezza. Le prove di trazione sono state condotte in controllo di spostamento ad una velocità di 2 mm/min seguendo le prescrizioni della norma ASTM D3039, sui provini con lunghezza di 500 mm e varie larghezze  $b_2$ . Due piastrine di alluminio sono state incollate alle estremità dei campioni utilizzando una resina epossidica termoindurente per migliorare la presa della macchina.

Fiber	$b^*$ [mm]	$t^*$ [mm]	$b_2$ [mm] ( $n$ )	$\bar{\sigma}^*$ [MPa] (CoV)
C	3.5	0.05	4(1), 20(3), 40(5), 60(8)	4330 (0.083)
S	-	-	60(33)	3700 (0.054)
G221	4.0	0.05	5(1), 20(3), 60(5)	1300 (0.142)

Tab. 3.5 – Proprietà geometriche e meccaniche delle fibre utilizzate.

La tabella 2 riporta le caratteristiche geometriche dei campioni ed i risultati in termini di resistenza alla trazione media  $\sigma^*$  per i provini con lo stesso tipo di fibra. Nella Tab. 3.5, C = carbonio, S = acciaio e G221 = vetro con densità  $\rho = 220 \text{ g/m}^2$ .

### **RISULTATI DELLA SPERIMENTAZIONE**

Vengono presentati i risultati sperimentali di 24 prove di taglio diretto condotte sugli accoppiamenti FRCM-calcestruzzo costituiti da diverse matrici e fibre. I campioni testati sono stati nominati in seguito con la notazione DS\_FM\_X\_Y\_Z, dove F = fibra impiegata (C = carbonio, S = acciaio, e G221 = vetro con densità per unità di spessore  $\rho = 220 \text{ g/m}^2$ ), M = matrice impiegata (vedi Tab. 3.4), X = lunghezza di applicazione ( $\ell$ ) in mm, Y = larghezza di incollaggio ( $b_1$ ) in mm, e Z = numero consecutivo del provino. Il carico massimo  $P^*$  e la tensione di picco corrispondente  $\sigma^*$  (definita in precedenza) sono riportati nella Tab. 3.6 per ciascun campione testato.

Specimen name	$P^*$ [kN]	$\sigma^*$ [MPa]	Specimen name	$P^*$ [kN]	$\sigma^*$ [MPa]
DS_CW_330_60_1	4770	3400	DS_G221S_330_60_1	-	-
DS_CW_330_60_2	3600	2570	DS_G221S_330_60_2	1350	1410
DS_CW_330_60_3	4260	3040	DS_G221S_330_60_3	1560	1630
DS_CW_450_60_1	3820	2730	DS_G221S_450_60_1	-	-
DS_CW_450_60_2	-	-	DS_G221S_450_60_2	1430	1490
DS_CW_450_60_3	-	-	DS_G221S_450_60_3	-	-
DS_CS_330_60_1	4260	3040	DS_SW_330_60_1	9920	6890
DS_CS_330_60_2	4510	3220	DS_SW_330_60_2	5840	4060
DS_CS_330_60_3	4900	3500	DS_SW_330_60_3	3920	2730
DS_CS_450_60_1	5820	4160	DS_SW_450_60_1	7270	5050
DS_CS_450_60_2	5720	4080	DS_SW_450_60_2	4500	3120
DS_CS_450_60_3	5510	3940	DS_SW_450_60_3	6270	4350

Tab. 3.6 – Carico di picco  $P^*$  e relativa tensione di picco  $\sigma^*$  per ogni prova di taglio diretto.

I campioni DS\_CW\_450\_60\_2 e DS\_CW\_450\_60\_3, composti da fibre di carbonio e matrice cementizia W, non hanno dato risultati a causa della rottura prematura di uno dei fasci di fibre sul bordo immediatamente all'esterno delle piastre di alluminio utilizzate per ancorare il campione. Queste rotture hanno suggerito una non uniforme distribuzione del carico tra i diversi fasci, che ha portato uno di questi a strapparsi prima degli altri. Per i restanti campioni FRCM in carbonio, con matrice W o S, le fibre a vista esterne alla zona di incollaggio sono state impregnate con una resina epossidica termoindurente per favorire una distribuzione più uniforme del carico applicato e per evitare rotture premature. Le risposte carico-spostamento globale dei campioni FRCM in carbonio con matrice S sono riportate in Fig. 3.12. Il meccanismo di rottura osservato è stato caratterizzato dal distacco della fibra dalla matrice. Questo comportamento è simile a quello osservato con i

compositi PBO-FRCM osservati dagli autori. Dopo un ramo lineare iniziale, partendo dal presupposto che esista una lunghezza efficace di incollaggio e che sia inferiore alla lunghezza di applicazione del composito testato, la risposta carico applicato-spostamento globale dei compositi FRCM con il carbonio diventa non lineare fino all'inizio dello scorrimento della fibra nella matrice (Fig. 3.13a). Dopo di che, il carico applicato aumenta per la presenza di attrito tra fibre e matrice e tra i filamenti di fibre della porzione della lunghezza di aderenza che è già delaminata. Quando il carico applicato raggiunge il carico massimo  $P^*$ , il meccanismo di legame è ancora completamente stabile e l'attrito fornisce il suo contributo sulla porzione della superficie incollata dove si è verificato il distacco. Quando il meccanismo di aderenza non è più stabile il carico applicato diminuisce a un valore costante che corrisponde al contributo di attrito. Confrontando i risultati dei campioni con differenti lunghezze di ancoraggio si può osservare che il carico massimo è maggiore nel caso di una lunghezza di aderenza superiore. Supponendo che la lunghezza di ancoraggio del composito testato sia più lunga della lunghezza di incollaggio efficace, il fatto che il carico massimo sia maggiore per i campioni con una lunghezza di ancoraggio superiore (Fig. 3.13a) è attribuito al maggiore apporto di attrito, mentre il carico di delaminazione rimane costante. Gli autori stanno effettuando ulteriori test per confermare questo comportamento e determinare la lunghezza efficace di incollaggio. I valori di carico applicato-spostamento globale dei campioni FRCM con carbonio e matrice W sono riportati in Fig. 3.13b. Le risposte di carico dei provini DS\_CW\_330\_60\_2, DS\_CW\_330\_60\_3 e DS\_CW\_450\_60\_1 sono simili al comportamento dei campioni FRCM con carbonio a matrice S, presentando una rottura imputabile allo scorrimento delle fibre nella matrice cementizia (Fig. 3.13). Il campione DS\_CW\_330\_60\_1 è giunto a rottura per stiramento della fibra dalla parte caricata della matrice (Fig. 3.13b). I valori massimi di carico dei campioni FRCM con carbonio e matrice S sono generalmente superiori a quelli dei campioni FRCM con carbonio e matrice W (Fig. 3.13), il che suggerisce un comportamento del legame di interfaccia fibra-matrice S migliore.

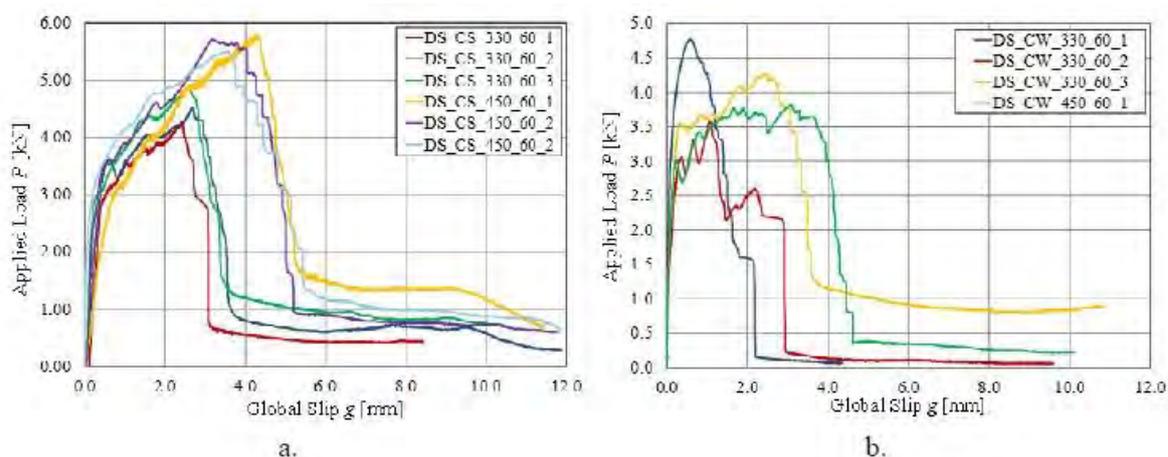


Fig. 3.12 – Risposta di carico applicato - scorrimento globale per il campione FRCM con carbonio con a) matrice S e b) matrice W.



Fig. 3.13 – a) Scorrimento delle fibre nei campioni DS\_CW\_330\_60\_3; b) Stiramento delle fibre all'interfaccia tra matrice cementizia e resina epossidica nel campione DS\_CW\_330\_60\_1.

Per tutti i campioni FRCM con vetro, le fibre libere al di fuori della zona di applicazione del composito sono state impregnate con una matrice epossidica per favorire una distribuzione uniforme del carico ad eccezione dei campioni DS\_G221S\_330\_60\_1 e DS\_G221S\_450\_60\_1, in cui effettivamente si è arrivati alla rottura delle fibre esterne a causa della distribuzione non uniforme del carico applicato. Le risposte di carico dei campioni DS\_G221S\_330\_60\_2, DS\_G221S\_330\_60\_3, e DS\_G221S\_450\_60\_2 sono riportati in Fig. 3.14a. Fatta eccezione per il campione DS\_G221S\_450\_60\_3, che non ha dato buoni risultati già ad un livello di carico molto basso a causa del danneggiamento delle fibre durante il confezionamento dei provini, i rimanenti campioni con fibre di vetro hanno manifestato la rottura della fibra dentro l'area incollata della matrice cementizia (Fig. 3.14b). La modalità di rottura è stata simile a quella osservata per i campioni FRCM con carbonio ed è stata caratterizzata dallo scorrimento delle fibre all'interno della

matrice cementizia. La Fig. 3.14a mostra che il carico applicato aumenta linearmente fino alla comparsa di microlesioni all'interfaccia matrice-fibra. Dopodiché la risposta in termini di carico diventa non lineare e raggiunge il massimo carico  $P^*$ , valore prossimo alla resistenza a trazione della fibra. Osservando l'andamento del carico (Fig. 3.14a), non è chiaro se il carico di distacco, che corrisponde alla delaminazione della fibra dalla matrice, sia stato raggiunto o le fibre abbiano ceduto prima che il meccanismo di trasferimento della tensione si sia completamente stabilito. La rottura della fibra è caratterizzata dal cosiddetto comportamento telescopico che, a causa della diversa impregnazione dei filamenti di fibra nel nucleo rispetto ai filamenti esterni, porta alcuni filamenti a rompersi prima degli altri. Dopo  $P^*$ , il carico applicato diminuisce con l'aumentare dello scorrimento globale, fino a quando tutti i filamenti dei fasci di fibre si rompono. A rottura avvenuta, l'attrito tra le fibre delaminate e la matrice circostante è la causa del carico residuo (Fig. 3.14a), che diminuisce con l'aumentare dello spostamento globale e la conseguente riduzione dell'area di contatto tra fibre e matrice.

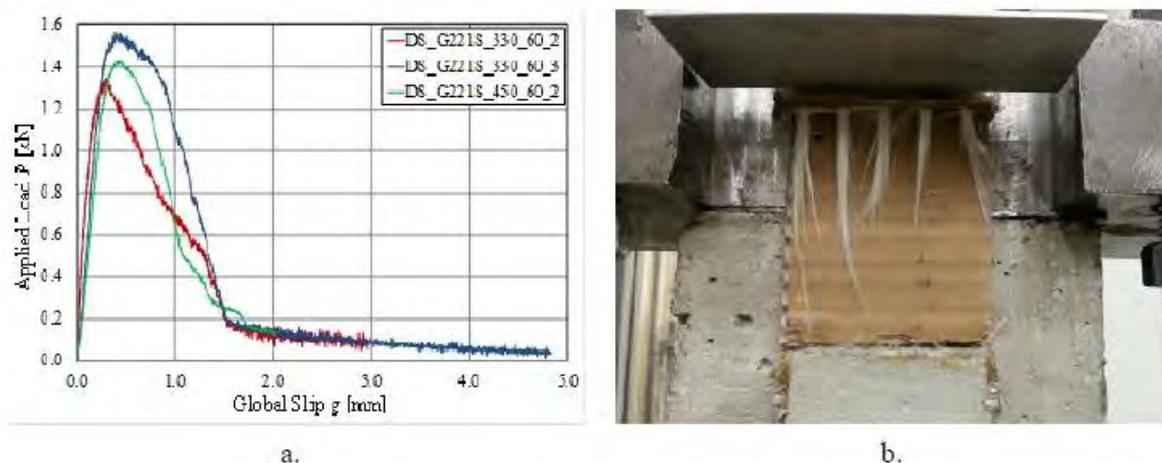


Fig. 3.14 – a) Risposta di carico applicato-scorrimento totale per i campioni con le fibre di vetro; b) Rottura delle fibre di vetro all'interfaccia tra la matrice cementizia e la resina epossidica.

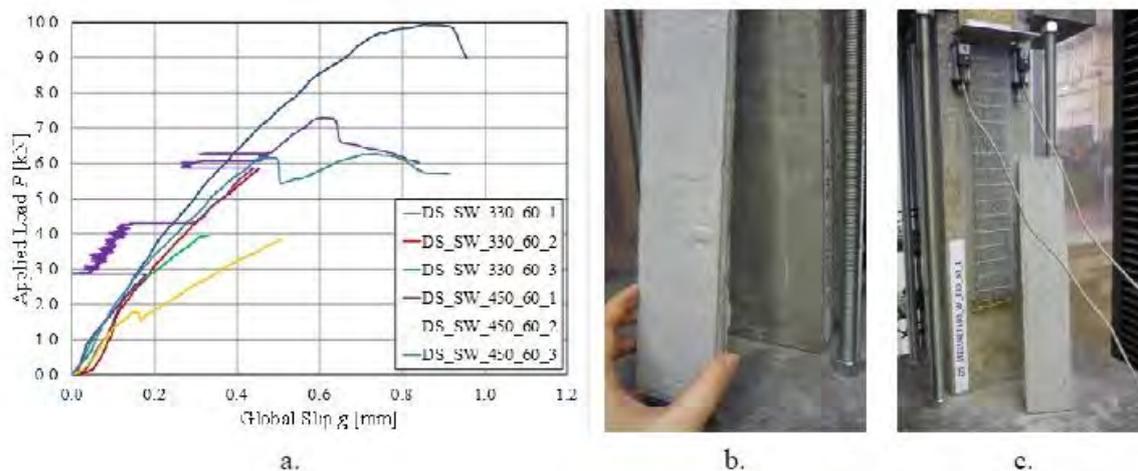


Fig. 3.15 - a) Risposta di carico applicato-scorrimento totale per i campioni FRCM; b) distacco del composito FRCM con acciaio nel campione DS\_SW\_450\_60\_2; c) Rottura per separazione della matrice nel campione DS\_SW\_330\_60\_1.

Le risposte carico-spostamento dei compositi FRCM con acciaio sono riportati in Fig. 3.15a. Va notato che gli sbalzi improvvisi dello spostamento, misurati per il campione DS\_SW\_450\_60\_1 erano causata da problemi con il sistema di acquisizione dati durante il test. I campioni con fibre in acciaio e matrice cementizia hanno mostrato una rottura fragile caratterizzata dalla delaminazione di tutto il composito dal substrato in calcestruzzo (Fig. 3.15b) ad eccezione del campione DS\_SW\_330\_60\_1, che ha mostrato una rottura dovuta alla separazione dei due strati della matrice (Fig. 3.15c). Va notato che il distacco è avvenuto all'interfaccia composito-substrato e non all'interno di un sottile strato di calcestruzzo, come accade normalmente nelle giunzioni FRP-calcestruzzo. La rottura per scissione dello strato esterno della matrice, che è stato anche osservato con lo stesso composito e un test di set-up diverso, è dovuta alla elevata densità dei fasci di fibra di acciaio che ha impedito allo strato di matrice esterna di penetrare completamente attraverso la rete e legare con lo strato interno.

### CONCLUSIONI

Questo documento presenta i risultati sperimentali di 24 prove di taglio diretto singolo effettuate su compositi FRCM comprendenti fibre di carbonio, acciaio e vetro, applicati ad un substrato di calcestruzzo con due differenti matrici cementizie. Le risposte di carico e le modalità di rottura osservate sono state diverse per ogni materiale composito considerato. Il composito FRCM con carbonio e matrice S è giunto a rottura a causa della delaminazione della fibra dalla matrice come già è stato osservato dagli autori con diverso composito FRCM. La delaminazione è stata caratterizzata da un aumento dello scorrimento delle fibre e dall'attrito tra fibre-matrice e tra i

filamenti di fibra. Il composito FRCM con carbonio a matrice W, con le fibre a vista impregnate con resina epossidica, si è rotto in un caso per lo stiramento delle fibre immediatamente al di fuori della matrice cementizia, mentre gli altri tre esemplari hanno manifestato una delaminazione delle fibre dalla matrice. I carichi di picco ottenuti sono stati in genere superiori con la matrice S che con la matrice W, indicando un comportamento migliore nel legame di interfaccia fibra-matrice S. Il composito FRCM con vetro ha mostrato un comportamento simile a quello dei composti FRCM con carbonio ma ha presentato la rottura delle fibre all'interno della zona cementizia incollata. I valori di massimo carico ottenuti erano vicini alla resistenza ultima della fibra e sono stati caratterizzati dalla progressiva rottura di filamenti di fibra e dal diverso comportamento di legame dei filamenti (comportamento telescopico). Il composito FRCM con acciaio si è rotto in un caso per la scissione della matrice e per i restanti cinque campioni è avvenuto il distacco dell'intero composito dal supporto in calcestruzzo. L'alta densità della rete in fibra di acciaio ha impedito allo strato di matrice esterna di penetrare completamente attraverso la rete in fibra e di legare con lo strato di matrice interna; ciò ha portato alla rottura per sezionamento della matrice.

Dal momento che le modalità di collasso osservate su composti FRCM con vetro e carbonio hanno coinvolto solo l'interfaccia matrice-fibra, i risultati ottenuti dovrebbero essere validi sia per supporti in calcestruzzo che in muratura, a condizione che il punto debole degli accoppiamenti FRCM-muratura sia all'interfaccia matrice-fibra.

### **3.3 MATRIX-FIBER BOND BEHAVIOR IN PBO FRCM COMPOSITES: A FRACTURE MECHANICS APPROACH**

**T.D'ANTINO, C.CARLONI, L.H.SNEED, C.PELLEGRINO**

Si riportano i risultati principali del comportamento di provini FRCM con PBO in sperimentazioni precedenti.

Per quanto riguarda la risposta carico-spostamento, il comportamento ideale viene espresso da Fig. 3.16. [4] [9] La prima parte del grafico viene rappresentato da un ramo lineare (OA) associato al comportamento elastico del legame fra le fibre e le matrici. Dopo il punto A si ha un tratto non lineare; l'interfaccia tra le fibre e la matrice presenta una qualche micro fessurazione. Il valore del carico applicato  $P$  aumenta fino al punto B corrispondente all'inizio della delaminazione all'interfaccia matrice-fibra. L'attrito tra singoli filamenti e tra fibre e matrice avviene nella porzione di composito in cui le fibre sono delaminate; di conseguenza si ha un

aumento del carico applicato anche dopo l'inizio della delaminazione (punto B). Se si assume che l'attrito dipenda solo dalle caratteristiche del materiale e dall'area di contatto tra le fibre delaminate e la matrice e che non diminuisca con l'aumentare dello scorrimento, si può assumere che il suo contributo aumenti linearmente con l'aumentare della lunghezza delaminata. Una lunghezza efficace  $l_{eff}$ , se esiste, deve quindi essere determinata dalla distribuzione delle deformazioni lungo le fibre nel punto B della risposta di carico, dove l'attrito non è ancora presente.

Le diverse fasi del meccanismo di trasferimento delle sollecitazioni, per i vari punti della risposta di carico, sono illustrate nella Fig. 3.16b. La lunghezza di incollaggio residua  $l_r$  è definita come la lunghezza effettiva della zona di incollaggio;  $l_r$  è dunque la lunghezza che si ha prima del punto B o nel punto B. Tra i punti B e C il carico applicato aumenta a causa dell'attrito finché il processo di delaminazione raggiunge la fine dell'area incollaggio. Nel punto C, il carico applicato raggiunge il massimo carico  $P^*$  e la lunghezza di incollaggio residua è uguale alla lunghezza efficace ( $l_r = l_{eff}$ ). Dopo il punto C il carico applicato inizia a diminuire perché il meccanismo di incollaggio non è più completamente stabilito ( $l_r < l_{eff}$ ). Dopo il punto D si ha un cambio di concavità della curva e il carico applicato si riduce più velocemente. In questa fase la lunghezza di incollaggio residua  $l_r$  è considerevolmente ridotta. Nel punto E le fibre sono completamente delaminate dalla matrice ( $l_r = 0$ ) e l'unico contributo viene fornito dall'attrito. La risposta di carico diventa, dunque, costante dopo il punto E alla quale corrisponde un valore di carico applicato  $P_f$ . La sollecitazione di taglio associata all'attrito può essere determinata dal punto E come:

$$\tau_f = \frac{P_f}{2nb^*l}$$

Dove ( $nb^*l$ ) è la superficie laterale di un lato dei fasci incollati. Il coefficiente 2 tiene conto del fatto che l'area di contatto tra le fibre e la matrice è due volte la zona di incollaggio dei fasci di fibre perché le fibre scorrono rispetto ad entrambi gli strati di matrice.

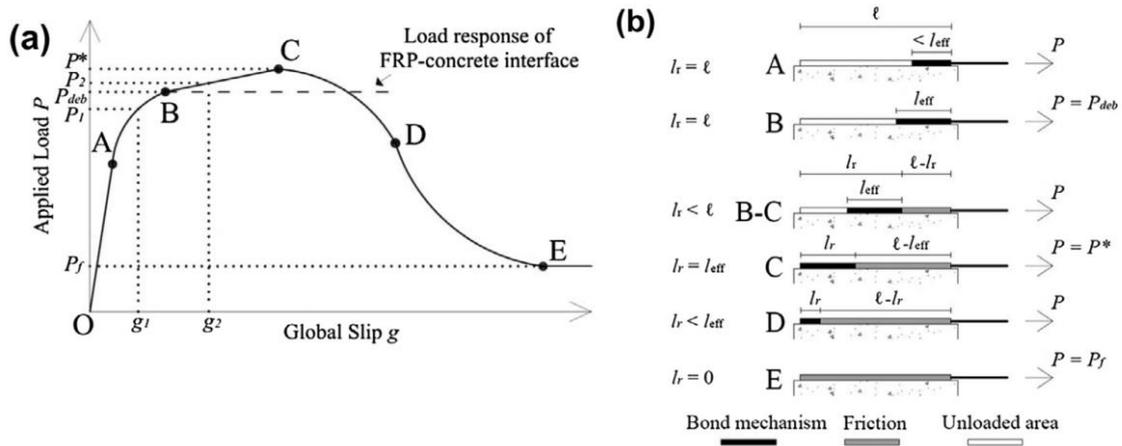


Fig. 3.16 – a) risposta di carico-spostamento ideale; b) fasi del meccanismo di trasferimento delle sollecitazioni corrispondenti ai vari punti della risposta di carico ideale. [4]

Per quanto riguarda i risultati attesi nell’analisi delle deformazioni con gli strain gauges, un comportamento adeguato è rappresentato in Fig. 3.17.

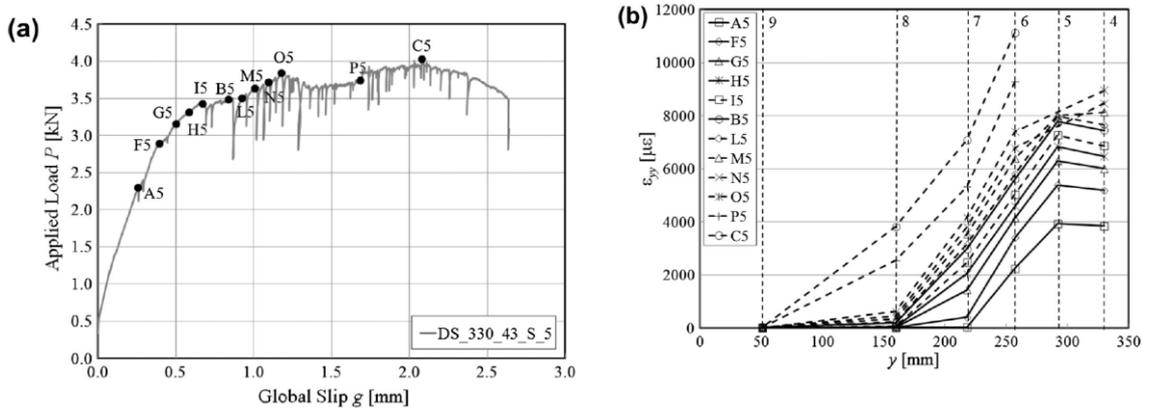


Fig. 3.17 – a) risposta carico-spostamento, vengono evidenziati i punti di analisi deformativa; b) grafico dell’andamento delle deformazioni per ogni punto di carico indicato. [4]

# CAPITOLO 4

## CARATTERIZZAZIONE DEI MATERIALI UTILIZZATI

---

Al fine di poter interpretare i risultati ottenuti dalle prove sperimentali, si è proceduto con l'effettuare una serie di prove preliminari atte a definire le caratteristiche meccaniche dei singoli materiali utilizzati.

Nella tabella si riportano tutti i materiali utilizzati, tipologia di prova condotta con la relativa normativa di riferimento e la tipologia di provini eseguiti.

MATERIALE	TIPO DI PROVA	PROVINI
Malta Concrete Rock S	Prova a compressione e flessione (UNI EN 1015-11)	n.20 provini dimensione 160x40x40 mm L = 160 mm
Carbonio C-NET 170 BL	Prova a trazione su fibra secca (ASTM 3039)	n.6 provini L = 500 mm
Vetro G-NET 251 BA	Prova a trazione su fibra secca (ASTM 3039)	n.5 provini L = 500 mm

*Tab. 4.1 – Materiali testati e normative di riferimento.*

Per quanto riguarda le prove condotte sui prismi di calcestruzzo, si riportano i valori ricavati dalla sperimentazione precedente in quanto si sono utilizzati gli stessi prismi di calcestruzzo come substrato per le applicazioni di composito FRCM. [9]

## 4.1 PROVA DI COMPRESIONE SUL CALCESTRUZZO

Il calcestruzzo utilizzato per la sperimentazione è un calcestruzzo tradizionale predosato per impiego strutturale ed è stato caratterizzato in laboratorio con prove di rottura a compressione su provini cubici confezionati e stagionati a 28 giorni di maturazione [9].

I provini in esame sono stati contrassegnati dalla nomenclatura CLS-An o CLS-Bn dove:

- CLS materiale del campione – calcestruzzo;
- A quantitativo d'acqua d'impasto pari a 1.6 litri a sacco;
- B quantitativo d'acqua d'impasto pari a 1.4 litri a sacco;
- n numero del campione.

La prova di schiacciamento viene eseguita su una macchina universale elettromeccanica Galdabini (fig. 4.1). Il campione viene posizionato senza alcuna interposizione di materiale deformabile fra le facce del provino e i piatti della macchina e viene sottoposto ad una sollecitazione assiale di compressione con velocità di carico pari a 0.4 MPa/s.



Fig. 4.1 – Macchina universale elettromeccanica Galdabini. [9]

Il tipo di rottura dal campione è indice della resistenza del calcestruzzo. Se il cubetto si rompe determinando una serie di piramidi più o meno regolari, con le facce che formano un angolo di circa 45° con la base, allora il calcestruzzo ha raggiunto senz'altro un'elevata resistenza a compressione. I calcestruzzi scadenti tendono invece a sgretolarsi senza precisi piani di rottura.

I risultati della prova eseguita vengono riassunti nella tabella Tab. 4.2.

Campione	Data di getto	Data di prova	a [mm]	b [mm]	h [mm]	sez. [mm <sup>2</sup> ]	Peso [Kg]	F <sub>u</sub> [Kg <sub>f</sub> ]	R <sub>ck</sub> [MPa]
CLS - A1	12/06/13	10/07/13	150	149	150	22350	7,97	117500	51,6
CLS - A2	12/06/13	10/07/13	150	152	150	22800	8,11	127000	54,6
CLS - A3	12/06/13	10/07/13	150	150	150	22500	8,09	127000	55,4
resistenza cubica media a compressione a 28 giorni:								misurata	53,9
								dichiarata	30,0
deviazione standard:									1,6
CLS - B1	12/06/13	10/07/13	150	150	150	22500	8,04	148000	64,5
CLS - B2	12/06/13	10/07/13	150	150	150	22500	8,21	153000	66,7
CLS - B3	12/06/13	10/07/13	150	151	150	22650	8,20	146000	63,2
resistenza cubica media a compressione a 28 giorni:								misurata	64,8
								dichiarata	30,0
deviazione standard:									1,4

Tab. 4.2 – Risultati della prova a compressione del calcestruzzo. [9]

## 4.2 PROVA DI CARATTERIZZAZIONE MALTA ROCK S

Il riferimento normativo per tale prova è costituito dalla UNI EN 1015-11 “Determinazione della resistenza a flessione e a compressione della malta indurita” [2]

I provini confezionati hanno forma prismatica di dimensione 160x40x40 mm, come prescrive la norma. Sono stati testati tre provini alla volta per poi ricavarne i valori medi.

La prova a flessione prevede l'utilizzo di una macchina di prova che vincola il provino alle estremità attraverso dei ritegni a rullo distanti 10 cm. Centralmente un terzo rullo imprime il carico progressivamente crescente a velocità costante, tale configurazione impone che nel mezzo del provino si generi un momento flettente crescente fino al raggiungimento del valore di rottura indicato dal cursore mobile sulla barra graduata della macchina. Importante è il posizionamento del provino, in quanto solo le facce gettate contro l'acciaio del cassero devono venire a contatto con i tre rulli di acciaio.



Fig. 4.2 – Macchina per prova a flessione.



Fig. 4.3 – Macchina per prova a compressione

Avvenuta la rottura per flessione, vengono utilizzati i rimanenti spezzoni di provino per il test a compressione. Tale prova viene eseguita con l'utilizzo di una pressa a controllo idraulico. Si interpone il provino, con le facce piane, tra i piatti della macchina. Le piastre che attuano la forza al provino di malta hanno un'impronta di 40x40 mm, in questo modo si agisce in un volume controllato e sempre costante di materiale.

#### 4.2.1 CARATTERIZZAZIONE MALTA ROCK S PER FIBRA C-NET 170 BL

La Concrete Rock S è una malta monocomponente tixotropica premiscelata a base di leganti inorganici, a reattività pozzolanica con leganti polimerici, fibrorinforzata e a ritiro compensato.

È un prodotto ideato per il ripristino strutturale in condizioni in cui le murature possano essere soggette all'attacco da parte di agenti aggressivi. Viene confezionata in sacchi da 25 kg, già pronta alla miscelazione con sola acqua (19% in peso della polvere) per ottenere un impasto tixotropico non segregabile e a ritiro compensato. Si veda ALLEGATO 1



Fig. 4.4 – Cassero per confezionamento di tre provini di malta delle dimensioni di 40x40x160 mm.

Sono stati eseguiti più prove differenziate nel tempo per i provini di malta relativi agli FRCM con la rete di carbonio. Lo scopo preposto era comprendere la velocità di raggiungimento delle caratteristiche meccaniche prescritte. Ogni cassero conteneva 3 provini, la scansione temporale dei test, dettata dalla normativa, è stata la seguente:

- 7 gg.
- 14 gg.
- 28 gg.
- Periodo in cui si è effettuato il test su FRCM – c.a 72 gg.

I provini vengono definiti attraverso una sigla composta dal nome della malta e dal numero sequenziale: Rock\_S\_n, dove:

- Rock\_S indica il materiale di cui è costituito il campione;
- \_n indica il numero consecutivo del campione;

I risultati ottenuti dalle prove a flessione e compressione sono riportati nelle seguenti tabelle.

TEST 7 GG								
Cast	Test	Name	Flex Strength [kg/cm <sup>2</sup> ]	Compressive strength [kg]		Flex Strength [Mpa]	Compressive strength [Mpa]	
14/05/2014	21/05/2014	Rock_S_1	25,80	1580	1640	2,53	9,69	10,06
14/05/2014	21/05/2014	Rock_S_2	28,60	1670	1650	2,81	10,24	10,12
14/05/2014	21/05/2014	Rock_S_3	28,30	1650	1630	2,78	10,12	9,99

Media sperimentale:	2,70	10,03
---------------------	------	-------

Tab. 4.3 – Valori ricavati a 7 giorni dal getto.

TEST 14 GG								
Cast	Test	Name	Flex Strength	Compressive strength		Flex Strength	Compressive strength	
			[kg/cm <sup>2</sup> ]	[kg]	[kg]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]
14/05/2014	28/05/2014	Rock_S_4	35,70	2370	2440	3,50	14,53	14,96
14/05/2014	28/05/2014	Rock_S_5	34,90	2510	2510	3,42	15,39	15,39
14/05/2014	28/05/2014	Rock_S_6	29,00	2550	2570	2,84	15,63	15,76
Media sperimentale:						3,26	15,28	

Tab. 4.4 – Valori ricavati a 14 giorni dal getto.

TEST 28 GG								
Cast	Test	Name	Flex Strength	Compressive strength		Flex Strength	Compressive strength	
			[kg/cm <sup>2</sup> ]	[kg]	[kg]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]
14/05/2014	11/06/2014	Rock_S_7	33,10	2180	2250	3,25	13,37	13,80
14/05/2014	11/06/2014	Rock_S_8	40,60	2740	2800	3,98	16,80	17,17
14/05/2014	11/06/2014	Rock_S_9	37,20	2400	2400	3,65	14,72	14,72
Media sperimentale:						3,63	15,09	

Tab. 4.5 – Valori ricavati a 28 giorni dal getto.

TEST PERIODO PROVA								
Cast	Test	Name	Flex Strength	Compressive strength		Flex Strength	Compressive strength	
			[kg/cm <sup>2</sup> ]	[kg]	[kg]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]
14/05/2014	25/07/2014	Rock_S_10	43,20	2900	2860	4,24	17,78	17,54
14/05/2014	25/07/2014	Rock_S_11	35,50	2850	2880	3,48	17,47	17,66
14/05/2014	25/07/2014	Rock_S_12	30,50	2350	2450	2,99	14,41	15,02
Media sperimentale:						3,57	16,65	

Tab. 4.6 – Valori ricavati il giorno dei test condotti su campioni di malta per prove con C-NET 170 BL.

Come si osserva in base ai valori ricavati, la resistenza a flessione e a compressione non sono paragonabili al valore dichiarato dal produttore, attestandosi ad un valore pari a circa il 60% dei 25 MPa dichiarati per la compressione. Valori di resistenza a trazione o flessione non vengono dichiarati.

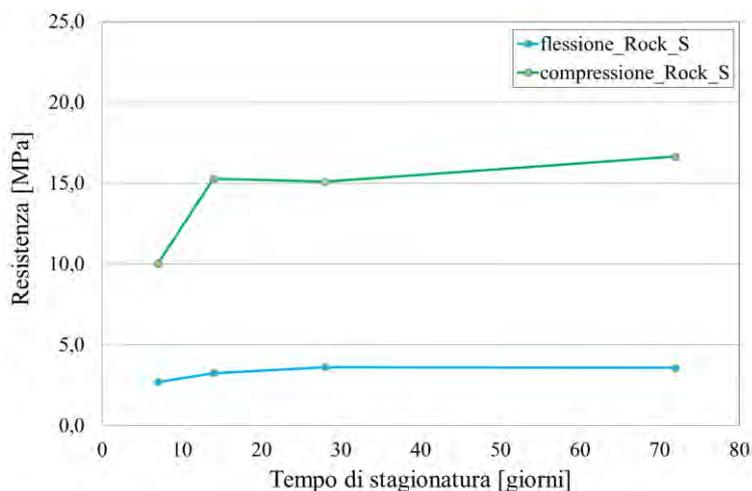


Fig. 4.5 –Andamento dei valori di resistenza ricavati dalle prove a compressione e flessione per Rock S.

#### 4.2.2 CARATTERIZZAZIONE MALTA ROCK S PER FIBRA G-NET 251 BA

Anche in questo caso si è seguita la stessa procedura di confezionamento dei provini durante la fase di applicazione della fibra sul calcestruzzo. Per questa fase della sperimentazione sono stati confezionati 5 campioni di malta su cui effettuare le prove a flessione e compressione. Si è optato di condurre il test solamente a 28 giorni dal getto. Tale data avrebbe coinciso con il momento in cui è stata eseguita la prova di taglio diretto con il vetro.

È stata utilizzata la stessa notazione per i seguenti provini. I valori ricavati sono esposti nella tabella.

TEST 28 GG - PERIODO PROVA								
Cast	Test	Name	Flex Strength	Compressive strength		Flex Strength	Compressive strength	
			[kg/cm <sup>2</sup> ]	[kg]	[kg]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]
13/08/2014	16/09/2014	Rock_S_13	45,10	2870,00	2830,00	4,42	17,60	17,35
13/08/2014	16/09/2014	Rock_S_14	45,20	2750,00	2740,00	4,43	16,86	16,80
13/08/2014	16/09/2014	Rock_S_15	46,20	2900,00	2850,00	4,53	17,78	17,47
13/08/2014	16/09/2014	Rock_S_16	45,40	2750,00	2760,00	4,45	16,86	16,92
13/08/2014	16/09/2014	Rock_S_17	42,20	2750,00	2730,00	4,14	16,86	16,74
Media sperimentale:						4,46	17,12	

Tab. 4.7 – Valori ricavati per la malta Rock S per i campioni di malta per prove con G-NET 251 BA.

#### 4.2.3 CARATTERIZZAZIONE MALTA ROCK S PER ULTERIORI PROVE

Nella terza serie di getti sono stati confezionati ulteriori provini FRCM uguali a quelli già prodotti, per conferma dei dati ottenuti, (capitolo 5) e quelli con gli strain gauges applicati alla fibra centrale. Anche per questa fase di confezionamento, sono stati preparati 3 provini di malta per il test a flessione e a compressione da condurre a 28 giorni. I risultati vengono espressi in tabella.

TEST 28 GG - PERIODO PROVA								
Cast	Test	Name	Flex Strength	Compressive strength		Flex Strength	Compressive strength	
			[kg/cm <sup>2</sup> ]	[kg]	[kg]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]
26/09/2014	28/10/2014	Rock_S_18	37,60	1910	1910	3,69	11,71	11,71
26/09/2014	28/10/2014	Rock_S_19	39,50	1800	1860	3,87	11,04	11,40
26/09/2014	28/10/2014	Rock_S_20	41,30	1880	1850	4,05	11,53	11,34
Media sperimentale:						3,87	11,46	

Tab. 4.8 – Valori ricavati per la malta Rock S per i provini di ulteriori prove.

### 4.3 PROVE DI TRAZIONE SULLE FIBRE

Il riferimento normativo per l'esecuzione dei test a trazione sulle fibre è l'ASTM D3039 "Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials". La quantità di prove per singolo materiale è sempre stata in numero superiore a tre.

Lo scopo è quello di condurre dei test direttamente sul materiale utilizzato per il confezionamento dei provini con lo scopo di verificare l'attendibilità dei valori da scheda tecnica. Sono state eseguite prove di trazione su campioni costituiti da un singolo fascio di fibre. La lunghezza de fascio è di 50 cm di lunghezza, alle estremità si sono applicate delle piastre di alluminio di spessore 2 mm incollate con resina epossidica bicomponente (Resin 75 \_ Allegato 4). Tali piastre hanno lo scopo di trasferire il carico dalla ganascia della macchina di prova alla fibra senza danneggiare la stessa ed evitare così di indurre tensioni localizzate causate dal serraggio.

Il test è stato condotto attraverso una macchina universale Galdabini 2500, capacità di carico pari a 25 kN. La velocità della prova è stata decisa partendo dalla stima della deformazione ultima dichiarata dal produttore in modo da raggiungerla in un tempo pari a 10 minuti, come indicato nella normativa di riferimento [10]. Tale velocità coincideva con 0.5 mm/min. Fig. 4.6



Fig. 4.6 – Macchina universale Galdabini 2500 per prove di trazione.

### 4.3.1 FIBRA DI CARBONIO C-NET 170 BL

La rete di fibra di carbonio C-NET 170 BL (Allegato 2), fornite dall'azienda G&P Intech, sono formate da fasci di fibre bidirezionali. I fasci trasversali sono disposti alternatamente da un lato e dall'altro rispetto ai fasci longitudinali. La larghezza di un singolo fascio  $b^*$  è pari a 4 mm mentre lo spessore nominale  $t^*$  è di 0.047 mm. L'area di un singolo fascio è stata calcolata essere pari a 0.94 mm<sup>2</sup>.

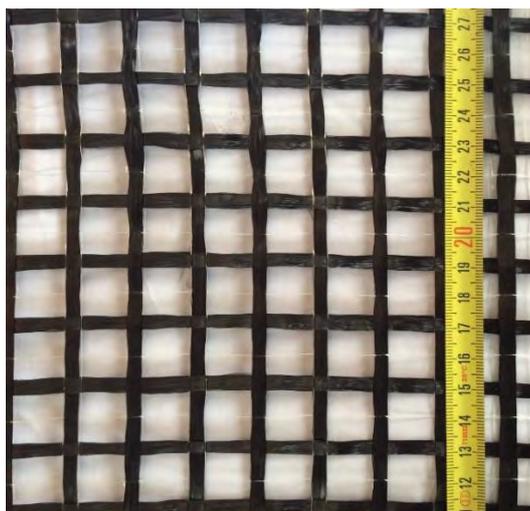


Fig. 4.7 – Rete in fibra di carbonio C-NET 170 BL

C-NET 170 BL	
Grammatura	170 g/m <sup>2</sup>
Modulo elastico	240 GPa
Resistenza a rottura filamento	4700 MPa
Allungamento ultimo	1,8 %

Tab. 4.9 – Valori caratteristici della fibra forniti dall'azienda.

Importante è stata l'applicazione di 2 piatti in alluminio alle estremità della fibra, attraverso l'utilizzo della resina epossidica Resin 75. Questo ha permesso di creare due ancoraggi che trasferissero il carico impresso dalle ganasce della Galdabini 2500 al fascio da testare.

I campioni testati vengono classificati con la notazione "C-NET 170 BL\_n", dove:

- C-NET 170 BL\_                      indica il materiale in esame
- n    indica il numero progressivo del campione

Per i valori di resistenza a flessione e compressione si veda Tab. 4.10.

Provino	Larghezza [mm]	Area singolo fascio [mm <sup>2</sup> ]	n° di fasci	Carico di rottura (P*) [N]	Resistenza a trazione [MPa]
C-NET 170 BL_1	4	0,94	1	887,6	944
C-NET 170 BL_2	4	0,94	1	828,5	881
C-NET 170 BL_3	4	0,94	1	1219,1	1297
C-NET 170 BL_4	4	0,94	1	1227,5	1306
C-NET 170 BL_5	4	0,94	1	1132,6	1205
C-NET 170 BL_6	4	0,94	1	1161,8	1236

valore scartato  
valore scartato

Valore medio [MPa]	1185	1261
Coefficiente di variazione	0,033	0,033

Tab. 4.10 – Risultati della prova a trazione sui provini C-NET 170 BL.

Dei 6 campioni testati ne sono stati scartati 2 per via del carico massimo troppo ridotto rispetto agli altri. Nonostante ciò la media aritmetica dei risultati del test rivela che la resistenza ultima della fibra è pari a 1261 MPa, valore corrispondente a circa il 27% del carico confermato dall'azienda produttrice e quindi di gran lunga inferiore. La causa è imputabile all'errata valutazione della sezione utile della fibra, che secondo l'azienda è inferiore. In Tab. 4.10 viene indicata la sezione del singolo fascio di carbonio. Questo valore non è stato calcolato con il semplice prodotto  $t \cdot b^*$ , ma considerando lo spessore nominale il valore riferito ad uno strato continuo di fibra di carbonio largo un metro. Quindi calcolata la sezione di questo ipotetico foglio, la si è divisa per il numero di fasci contenuti in un metro di fibra, cioè 50. Il valore che ne risultava era ben superiore a quello ottenibile dal singolo rapporto.

Il meccanismo di rottura non è stato istantaneo e non ha interessato una zona localizzata lungo la fibra. Il collasso avveniva per la rottura diffusa e progressiva delle singole fibre costituenti il fascio, generando nella risposta di carico un appiattimento della curva, si veda Fig. 4.8.

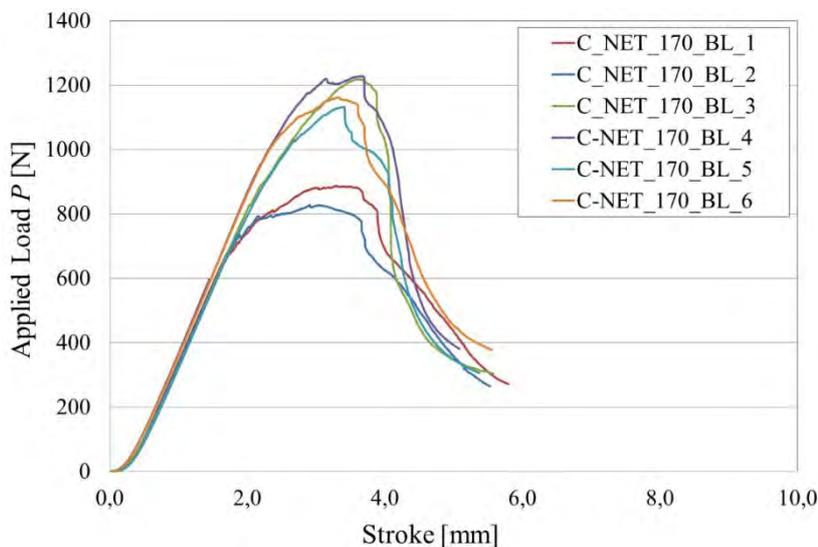


Fig. 4.8 – grafico carico-spostamento relativo alle prove di trazione su C-NET 170 BL.

È possibile osservare la modalità di rottura della fibra in Fig. 4.9, in cui non si evidenzia una rottura netta della fibra ma la rottura diffusa dei singoli filamenti e il conseguente rigonfiamento della fibra stessa.



*Fig. 4.9 – Prova a trazione C-NET 170 BL; esito della prova a trazione C-NET 170 BL: particolare della fibra rotta.*

### 4.3.2 FIBRA DI VETRO G-NET 251 BA

G-NET 251 BA (Allegato 3), fornita dall'azienda G&P Intech, è una rete di rinforzo bidirezionale a maglie intrecciate in vetro AR (alta resistenza). La fibra contiene una percentuale di ossido di zirconio superiore al 16%, tale sostanza le permette di resistere agli ambienti alcalini, tipici delle malte cementizie e a base di calce. La fibra presenta un trattamento superficiale, definito appretto, che ne migliora la compatibilità e le caratteristiche di adesione con il supporto.

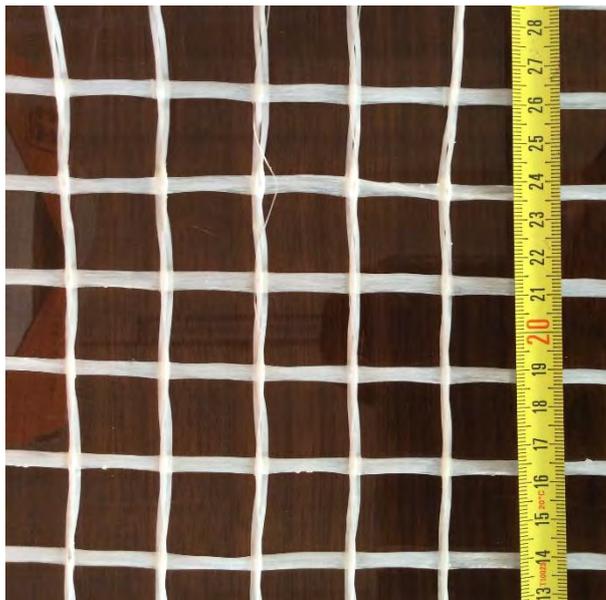


Fig. 4.10 – Fibra di vetro G-NET 251 BA.

G-NET 251 BA	
Grammatura	250 g/m <sup>2</sup>
Modulo elastico	70 GPa
Resistenza a rottura filamento	>2000 MPa
Allungamento ultimo	3 %

Tab. 4.11 –Valori caratteristici della fibra forniti dall'azienda.

I campioni sono stati preparati con le stesse modalità del C-NET 170 BL, con particolare riguardo alla manipolazione della fibra stessa durante le varie fasi del confezionamento. Il materiale testato, infatti, presentava una rigidità superiore alla fibra di carbonio, evidenziandone pertanto una maggiore fragilità. Sono stati testati 5 campioni di lunghezza pari a 50 cm. Le estremità della fibra sono state ancorate alle piastre di alluminio di dimensioni 20x60 mm con Resin 75, si veda Fig. 4.11.

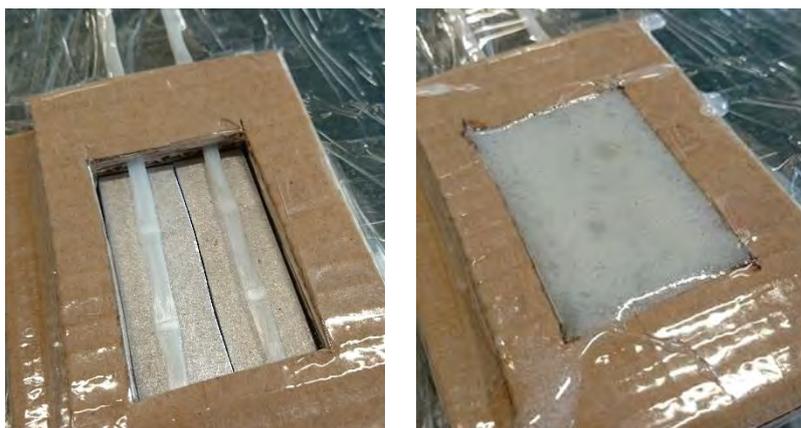


Fig. 4.11 – Applicazione delle piastrelle di ancoraggio mediante Resin 75.

Data la fluidità della resina si è stati costretti a creare un cassero di cartone che la tenesse confinata durante la fase di indurimento. Il cassero visibile in Fig. 4.11 è per due campioni. In seguito, applicate le piastre superiori e atteso il tempo di indurimento, pari ad una settimana, si è proceduto con il taglio del blocchetto nel punto di giunzione delle piastre in alluminio. Si è adottato questo sistema per praticità nell'esecuzione delle piastre di ancoraggio.

I campioni testati vengono classificati con la notazione "G-NET 251 BA\_n", dove:

- G-NET 251 BA\_                      indica il materiale in esame
- n    indica il numero progressivo del campione

Nella tabella seguente vengono mostrati i risultati del test di trazione nei 5 provini G-NET 251 BA.

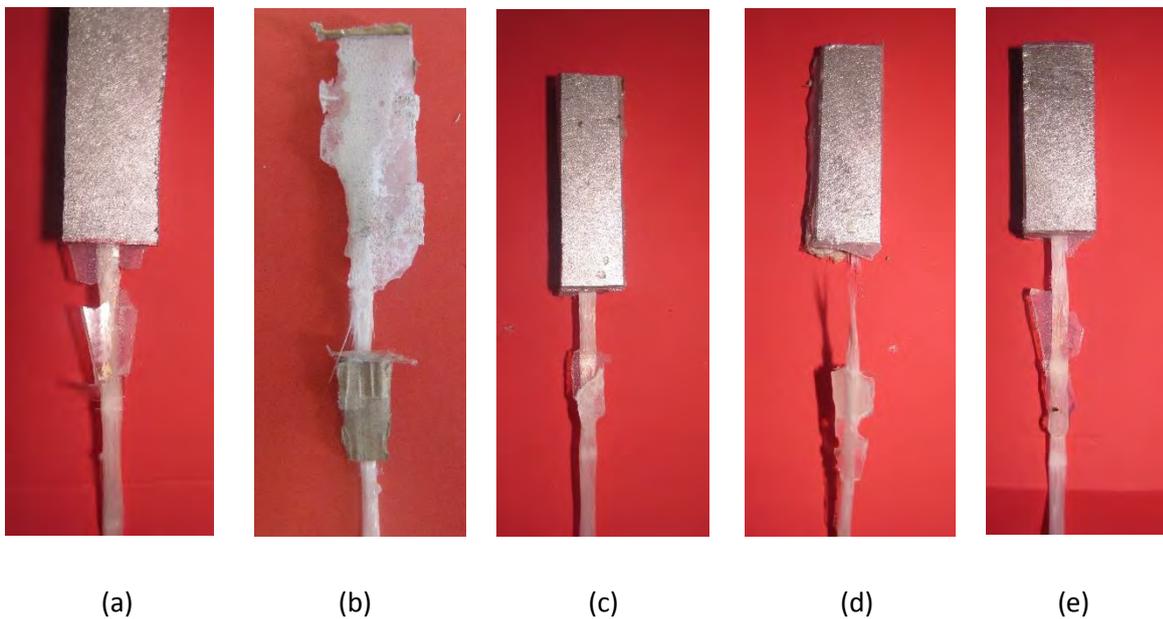
Provino	Larghezza [mm]	Area singolo fascio [mm <sup>2</sup> ]	n° di fasci	Carico di rottura (P*) [N]	Resistenza a trazione [MPa]
G-NET 251 BA_1	5	1,25	1	863,0	690
G-NET 251 BA_2	5	1,25	1	905,3	724
G-NET 251 BA_3	5	1,25	1	928,9	743
G-NET 251 BA_4	5	1,25	1	888,0	710
G-NET 251 BA_5	5	1,25	1	902,0	722
Valore medio [MPa]				897,4	718
Coefficiente di variazione				0,024	0,024

Tab. 4.1 – Risultati della prova a trazione per i provini G-NET 251 BA.

Come emerge dai valori, la resistenza si attesta intorno al 35% rispetto a quella fornita dalle schede tecniche della G&P Intech. La causa è imputabile all'errata valutazione della sezione della fibra stessa da parte dell'azienda, in quanto se venisse utilizzato il valore ottenuto dal

prodotto della larghezza della fibra per lo spessore dichiarato, si otterrebbe un valore nettamente inferiore al valore ricavato in laboratorio. Ciò porterebbe a computare tensioni molto superiori a quelle ottenute.

Nonostante i valori di carico siano abbastanza omogenei, si sono riscontrate due modalità di rottura apparentemente differenti. In particolar modo il cedimento della fibra si è sempre localizzato nella zona di ancoraggio. I campioni \_1, \_3 (si veda Fig. 4.12) hanno raggiunto il carico massimo per scorrimento della fibra all'interno della resina, mentre i provini \_2, \_4, \_5 hanno raggiunto il collasso per rottura vera e propria della fibra.



*Fig. 4.12 – a) particolare rottura fibra G-NET 251 BA\_1; b) particolare rottura fibra G-NET 251 BA\_2; c) particolare rottura fibra G-NET 251 BA\_3; d) particolare rottura fibra G-NET 251 BA\_4; e) particolare rottura fibra G-NET 251 BA\_5;*

# CAPITOLO 5

## SPERIMENTAZIONE E RISULTATI

### 5.1 OGGETTO DELLA SPERIMENTAZIONE

In questo elaborato di tesi verranno descritti i passaggi per l'esecuzione delle prove di taglio diretto (*direct shear test*) su vari campioni FRCM precedentemente preparati. In seguito, saranno esposti i risultati ottenuti e l'elaborazione dei dati, al fine di trarre delle conclusioni sul comportamento del legame tra FRCM e calcestruzzo. Tutte le prove sono state condotte nel "Laboratorio Sperimentale per le Prove sui Materiali da Costruzione" del Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale della Facoltà di Ingegneria di Padova. Tutto il materiale utilizzato per preparare i provini ci è stato fornito dalla ditta "G&P Intech".

### 5.2 PREPARAZIONE DEI PROVINI

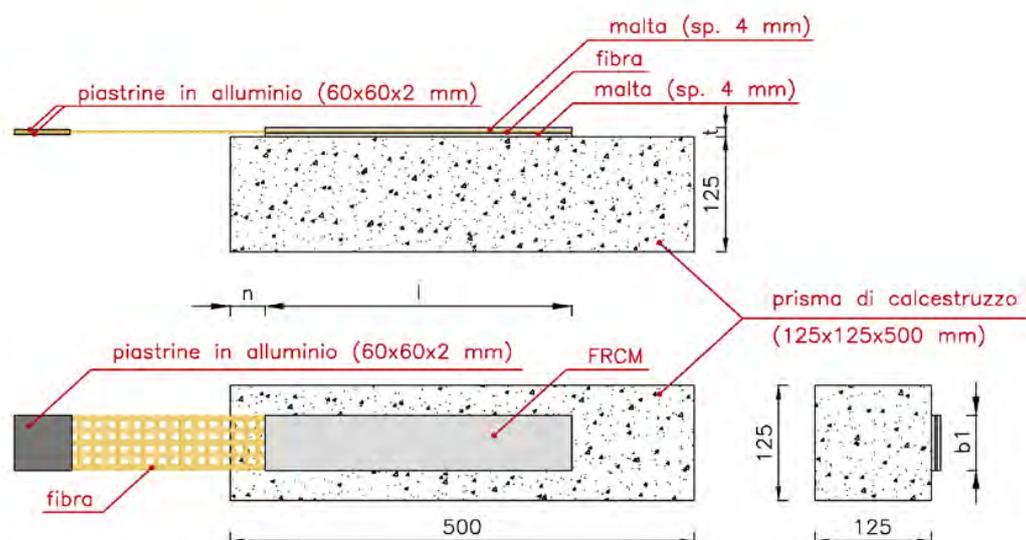


Fig. 5.1 – Schema del provino [9].

Nella Fig. 5.1 è possibile vedere il modello con cui venivano confezionati i provini. Per la precedente sperimentazione erano stati realizzati 12 campioni di calcestruzzo di 125 mm di larghezza, 125 mm di profondità e 500 mm di altezza. Il calcestruzzo utilizzato per la sperimentazione è di tipo tradizionale predosato per impiego strutturale. La preparazione dell'impasto è avvenuta a mano, fino ad ottenere un betoncino omogeneo pronto all'uso [9]. Quindi disponendo già dei prismi in calcestruzzo, sono stati riutilizzati gli stessi della sperimentazione precedente. È stato effettuato un trattamento di sabbiatura superficiale atto ad asportare ogni traccia delle precedenti applicazioni e portare così la superficie al nudo calcestruzzo.

Nella sperimentazione precedente [9] si era proceduto all'applicazione di tutto il materiale da testare all'inizio e poi si era passati alla fase delle prove di taglio diretto. Questo potrebbe aver inciso negativamente, poiché ogni prisma aveva le tre facce occupate dalle applicazioni del composito FRCM, in questo modo durante il test di un provino su una faccia, si rischiava di danneggiare le altre due con il montaggio del set-up di prova o con la testa della traversa della macchina. Per la sperimentazione qui descritta si è preferito applicare una sola faccia di ogni provino e poi proseguire con le prove su quelle applicazioni a maturazione avvenuta. Disponendo quindi di 36 facce, le prove sono state condotte in 3 turni separati. Questa decisione è stata adottata per evitare il possibile danneggiamento delle fibre o del composito FRCM. A seguito viene esposto l'iter con cui si sono confezionate le varie tipologie di provini da testare mediante prova di taglio diretto. L'ordine dell'esposizione sarà quello relativo ai tre turni di prove. Nel primo turno di prove sono stati preparati i compositi FRCM con rete di carbonio C-NET 170 BL, nel secondo turno sono stati preparati i compositi FRCM con rete di vetro G-NET251 BA e nel terzo ed ultimo turno si sono preparati i 4 provini di tipologia identica a quella delle precedenti prove, ma relativi alle lunghezze di aderenza in cui si aveva più variabilità di risultati. Sempre in questo turno si sono prodotti 3 ulteriori campioni con G-NET 170 BL, con lunghezza di aderenza pari a 450 mm, con strain gauges.

### **5.2.1 PRIMO TURNO DI PROVE – C-NET 170 BL**

Il primo turno di applicazioni è stato eseguito con malta Rock S e rete di fibra di carbonio C-NET 170 BL. In Fig. 5.2, Fig. 5.3 e Fig. 5.4 è possibile vedere le fasi di preparazione di alcuni provini che sono stato confezionati per questo primo turno di prove di taglio diretto.



*Fig. 5.2 – Stesura primo strato di matrice all'interno del cassero inferiore, aderente al prisma.*



*Fig. 5.3 – Applicazione della fibra C-NET 170 BL con leggera pressione.*



*Fig. 5.4 – Applicazione del secondo strato di matrice Rock S all'interno del secondo cassero superiore alla fibra C-NET 170 BL.*

Per la stesura del composito FRCM con la fibra di carbonio sono state costruite delle maschere di cartone e plastificate mediante nastro adesivo in modo che fungessero da cassero per l'applicazione degli strati di malta in modo preciso e a spessore costante, si veda Fig. 5.2. Lo spessore delle maschere era di 4 mm. I 12 provini preparati sono stati divisi in 4 gruppi, da tre campioni ciascuno, per lunghezza di aderenza ( $l$ ) assunte pari a 100, 200, 330 e 450 mm. La larghezza del foro, coincidente con la larghezza dell'applicazione FRCM, era costante per tutti i provini e pari a 60 mm. Il cassero veniva posizionato in modo che il foro fosse centrato con l'asse del provino, il bordo superiore della maschera aveva una larghezza pari a 38 mm, questo serviva a distanziare la fine dell'applicazione del composito FRCM dal bordo superiore del prisma, tale distanza è indicata con "n" in Fig. 5.1.

La prima maschera di cartone veniva messa a contatto con il prisma e ancorata con del nastro. Affinché parte della malta durante il getto non fluisse al di sotto della maschera e aderisse al prisma, si è proceduto con isolare la parte di calcestruzzo nella quale non andava applicato il composito FRCM con del nastro trasparente, si veda il provino più in alto nella Fig. 5.4. Applicato il primo strato di malta e rasato con una cazzuola, è stata posizionata la fibra con le fibre longitudinali parallele alla lunghezza del cassero. Si è fatto attenzione che la fibra sporgesse anche dalla parte opposta a quella nella quale veniva ancorata alla macchina, per circa 1.5 cm. Lo scopo di tale operazione era quello di poter verificare, durante la prova a taglio diretto, quali fasci della rete scorrevano all'interno della matrice e quali si sarebbero eventualmente spezzati. La fibra di carbonio utilizzata aveva una maglia quadrata con passo dei fasci pari a 20 mm e sono stati lasciati 10 mm di spazio tra le fibre esterne della rete posata e il bordo interno del cassero, questo motiva la larghezza del cassero pari a 60 mm. La porzione di rete applicata conteneva 3 fasci longitudinali. Posata la rete in carbonio si è proceduto con il collocare la maschera di cartone superiore all'interno della quale è stato gettato il secondo strato di malta sempre da 4 mm di spessore. Durante questa fase, parte della malta preparata per comporre la matrice, è stata utilizzata per confezionare dei provini da testare a tempi di maturazione diversi per la caratterizzazione meccanica. Completati i getti, i provini di composito FRCM sono stati posti a maturare in un luogo con temperatura e umidità controllate.



Fig. 5.5 – Applicazione composito FRCM completata, campione DS\_CS17\_100\_60\_2.

Successivamente alla maturazione dei provini e preventivamente alle prove di taglio diretto, è stato necessario trattare opportunamente la fibra esterna al composito FRCM in modo che non venisse danneggiata durante la prova. Un ulteriore motivo era quello di poter fornire un incremento della resistenza per evitare che il collasso avvenisse al di fuori della zona di applicazione della matrice, cosa che avrebbe causato la non riuscita il test.



Fig. 5.6 – Impregnazione di resina delle fibre esterne con applicazione di piastrine di alluminio.

Per eseguire questa fase si è utilizzata della resina epossidica bicomponente Resin 75 (Allegato 4). Il prodotto ci è stato fornito dall'azienda G&P Intech e dichiarato compatibile con il materiale da trattare. Per l'applicazione è stato necessario disporre i provini in serie, sollevare le fibre per mantenerle orizzontali e costruire appositi casseri in cartone. Il cassero è stato isolato

con un film plastico di polietilene in modo che la resina non fluisse tra le fessure e all'interno è stata adagiata la rete di fibra di carbonio C-NET 170 BL. Sempre all'interno del cassero, al di sotto della fibra è stata posta una piastrina di alluminio 60x60 mm e di spessore 2 mm. Sono stati miscelati i due componenti A e B del composto Resin 75 secondo il rapporto 5:2.7, come indicato dal produttore, vedi Allegato 04. Versata la resina all'interno dei casseri si è applicata un'altra piastrina di alluminio superiormente. In questo modo le piastre di alluminio, che avrebbero costituito la parte da ancorare alla macchina, erano solidamente connesse alla rete attraverso lo stesso getto di resina. Le piastre sono state preliminarmente smerigliate per facilitare sia l'adesione alla resina che migliorare la presa del sistema di ancoraggio della macchina. Lo scopo della resina è quello di trasferire il carico impresso dalla macchina di prova alle fibre immerse nella matrice cementizia nel modo più uniforme possibile. Il tempo di attesa per l'asciugatura della resina è stato di 7 giorni.

I provini sono stati classificati secondo la notazione DS\_FMN\_X\_Y\_Z, dove:

- DS = direct shear (prove di taglio diretto);
- F = tipologia della fibra usata (C: carbonio; G: vetro);
- M = malta (Rock S)
- N = numero relativo alla grammatura della fibra usata;
- X = lunghezza di incollaggio (l) in mm;
- Y = larghezza di incollaggio ( $b_1$ ) in mm;
- Z = numero del provino

Provino	$b_1$ [mm]	L [mm]	Malta	Fibra	Numero di fasci
DS_CS17_100_60_1	60	100	Rock_S	C-NET 170 BL	3
DS_CS17_100_60_2	60	100	Rock_S	C-NET 170 BL	3
DS_CS17_100_60_3	60	100	Rock_S	C-NET 170 BL	3
DS_CS17_200_60_1	60	200	Rock_S	C-NET 170 BL	3
DS_CS17_200_60_2	60	200	Rock_S	C-NET 170 BL	3
DS_CS17_200_60_3	60	200	Rock_S	C-NET 170 BL	3
DS_CS17_330_60_1	60	330	Rock_S	C-NET 170 BL	3
DS_CS17_330_60_2	60	330	Rock_S	C-NET 170 BL	3
DS_CS17_330_60_3	60	330	Rock_S	C-NET 170 BL	3
DS_CS17_450_60_1	60	450	Rock_S	C-NET 170 BL	3
DS_CS17_450_60_2	60	450	Rock_S	C-NET 170 BL	3
DS_CS17_450_60_3	60	450	Rock_S	C-NET 170 BL	3

Tab. 5.1 – Tabella dei campioni effettuati per il primo turno di prove.

## 5.2.2 SECONDO TURNO DI PROVE – G-NET 251 BA

La seconda serie di test è stata condotta su provini confezionati con malta Rock S e rete di fibra di vetro G-NET 251 BA. La procedura seguita per l'applicazione della matrice cementizia e della rete di fibra risulta simile a quella esposta in § 5.2.1. I provini sono stati preparati nella faccia adiacente a quella utilizzata per l'applicazione del carbonio dopo averne staccato i residui rimasti dopo la prova. Anche in questo caso le lunghezze di incollaggio erano di 100, 200, 330 e 450 mm. La larghezza dei casseri in cartone questa volta era di 55 mm circa. Lo scopo era di gettare la matrice in modo che le fasce esterne della fibra di vetro toccassero il bordo interno del cassero senza che si interponesse della malta. Le fibre avevano una lunghezza complessiva di  $l+n+250\text{mm}$ , si veda Fig. 5.1. La porzione di fibra utilizzata conteneva al suo interno tre fibre longitudinali.



*Fig. 5.7 – Vista della rete G-NET 251 BA prima della stesura del secondo strato e campioni pronti per la resinatura della fibra esterna.*

Molta importanza è stata rivolta alla manipolazione delle fibre. Avendo subito un processo di apprettatura, le fibre risultavano irrigidite e il fatto che il materiale costituente fosse vetro, risultavano particolarmente fragili alla piegatura.

La fase di impregnazione della fibra esterna al composito FRCM risulta analoga a quella condotta per la rete di carbonio esposta nel precedente paragrafo, § 5.2.1.

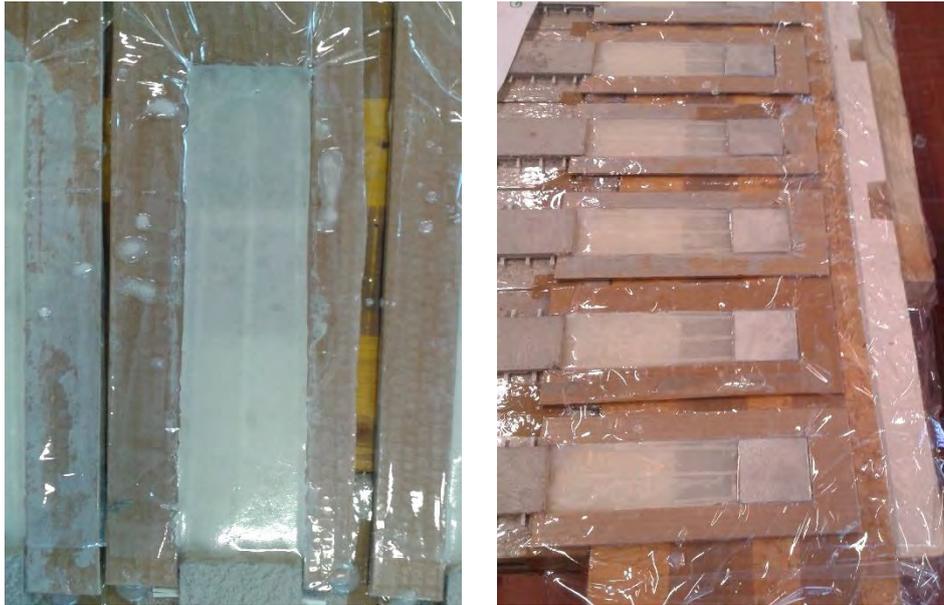


Fig. 5.8 – Particolare cassero resinatura dei campioni con G-NET 251 BA.

I provini sono stati classificati secondo la notazione DS\_FMN\_X\_Y\_Z, dove:

- DS = direct shear (prove di taglio diretto);
- F = tipologia della fibra usata (C: carbonio; G: vetro);
- M = malta (Rock S)
- N = numero relativo alla grammatura della fibra usata;
- X = lunghezza di incollaggio (l) in mm;
- Y = larghezza di incollaggio ( $b_1$ ) in mm;
- Z = numero del provino

Provino	$b_1$ [mm]	L [mm]	Malta	Fibra	Numero di fasci
DS_GS25_100_55_1	55	100	Rock_S	G-NET 251 BA	3
DS_GS25_100_55_2	55	100	Rock_S	G-NET 251 BA	3
DS_GS25_100_55_3	55	100	Rock_S	G-NET 251 BA	3
DS_GS25_200_55_1	55	200	Rock_S	G-NET 251 BA	3
DS_GS25_200_55_2	55	200	Rock_S	G-NET 251 BA	3
DS_GS25_200_55_3	55	200	Rock_S	G-NET 251 BA	3
DS_GS25_330_55_1	55	330	Rock_S	G-NET 251 BA	3
DS_GS25_330_55_2	55	330	Rock_S	G-NET 251 BA	3
DS_GS25_330_55_3	55	330	Rock_S	G-NET 251 BA	3
DS_GS25_450_55_1	55	450	Rock_S	G-NET 251 BA	3
DS_GS25_450_55_2	55	450	Rock_S	G-NET 251 BA	3
DS_GS25_450_55_3	55	450	Rock_S	G-NET 251 BA	3

Tab. 5.2 – Tabella dei campioni preparati per il secondo turno di prove.

### 5.2.3 TERZO TURNO DI PROVE – PROVINI AGGIUNTIVI E STRAIN GAUGES

In questa ultima fase di sperimentazione si è deciso di ripetere il test per alcuni campioni al fine di convalidare i risultati ottenuti. Ciò ha portato a dover confezionare 4 nuovi provini simili a quelli già eseguiti:

- DS\_CS17\_100\_60\_4
- DS\_CS17\_330\_60\_4
- DS\_GS25\_100\_55\_4
- DS\_GS25\_200\_55\_4

Questa fase della sperimentazione ha visto anche la preparazione di provini di lunghezza ( $l$ ) 450 mm, larghezza ( $b_1$ ) pari a 60 mm in cui sono stati applicati nella fibra centrale dei particolari misuratori di deformazione definiti “strain gauges”. Si veda Fig. 5.9.

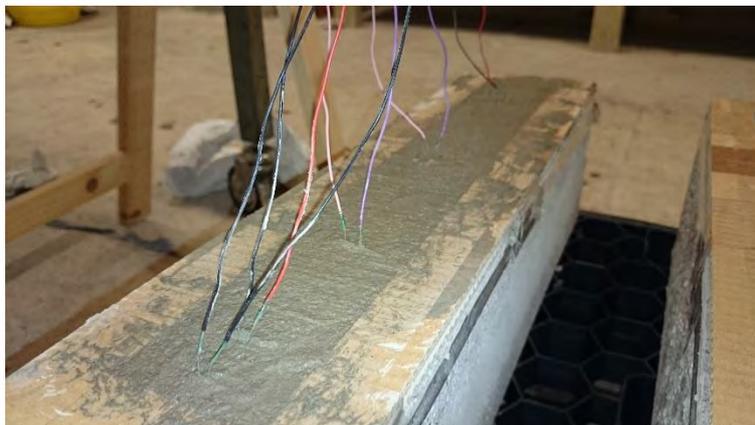


Fig. 5.9 – Esempio di provino DS\_CS17\_450\_60\_S

Per la preparazione della fibra si è seguito il procedimento relativo ai provini del primo turno di prove al § 5.2.1. Sono state tagliate tre fettucce di rete C-NET 170 BL per la preparazione di provini con lunghezza di applicazione pari a 450mm, identiche a quelle usate per confezionare i provini della serie DS\_CS17\_450\_60. Si è optato per posizionare gli strain gauges nei punti in cui si riteneva più interessante la rilevazione delle deformazioni durante la prova di taglio diretto, si veda figura Fig. 5.9.

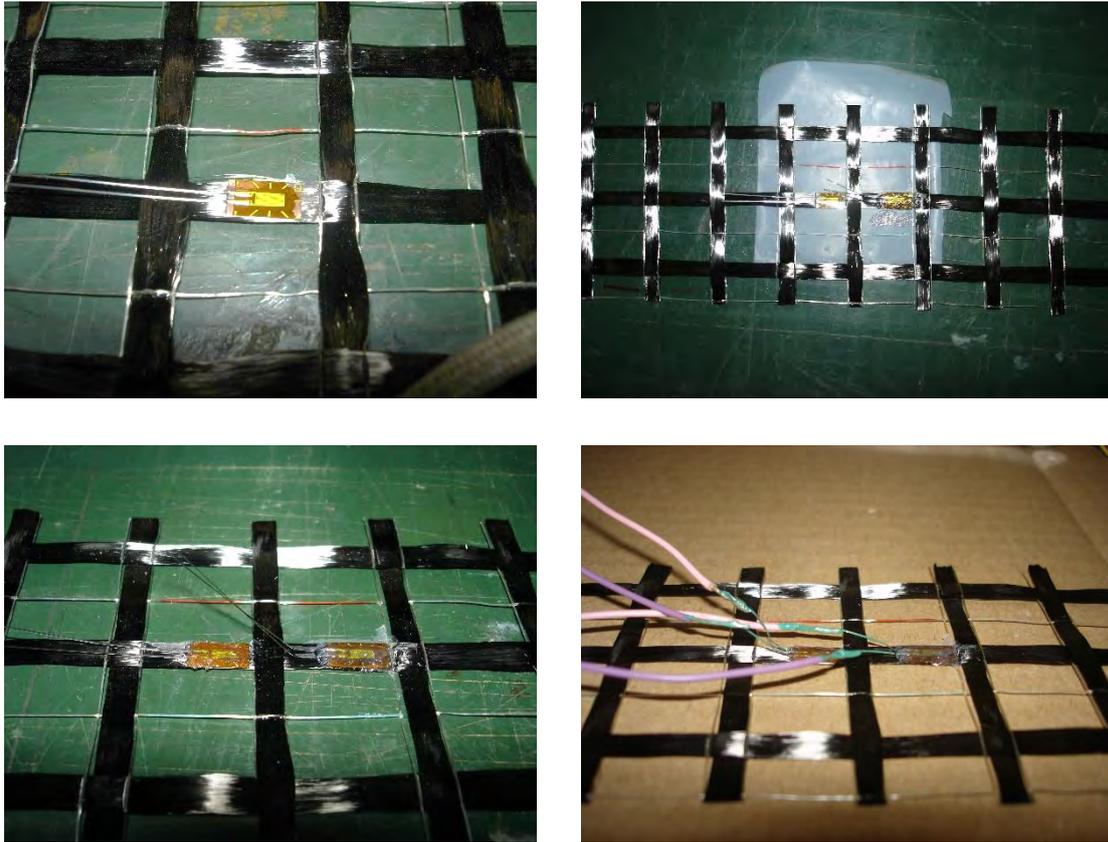


Fig. 5.10 – Fasi dell'applicazione degli strain gauges sul fascio centrale della rete C-NET 170 BL.

Per applicare gli strain gauges alla fibra si è proceduto con il pulire la zona di adesione con un prodotto a base di alcol isopropilico e acetone al fine di eliminare ogni residuo di grasso o polvere. Fatto ciò, è stato utilizzato un adesivo monocomponente a base di 2-cianoacrilato di metile per connettere gli strain gauges al carbonio. Applicata una piccolissima quantità sulla fibra, lo strain gauges è stato posto sopra e premuto per circa un minuto. Per evitare che l'adesivo incollasse la fibra al tavolo o alla pelle sono stati usati 2 foglietti di teflon, posizionati uno sotto la fibra e l'altro sopra lo strain gauges.

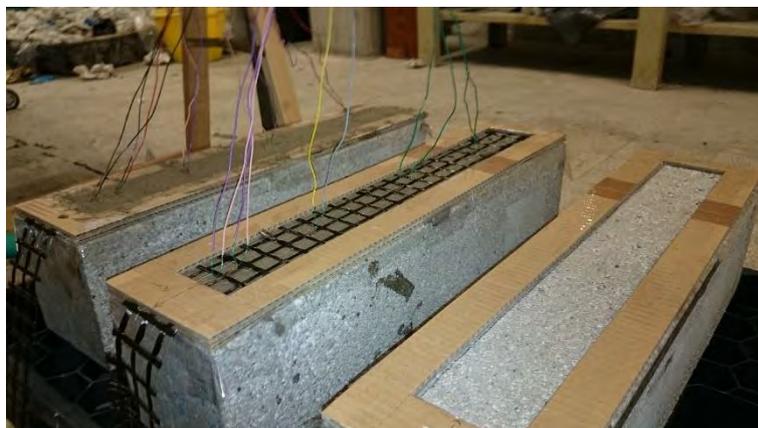


Fig. 5.11 – Provini DS\_CS17\_450\_60\_S nelle varie fasi di produzione.

Una volta applicati gli strain gauges, è stata depositata una piccola quantità di silicone al di sopra dello strain gauges, si veda la terza foto in Fig. 5.10. Lo scopo era di isolare dalla matrice cementizia il dispositivo di misurazione in modo che rilevasse solamente la deformazione della fibra.

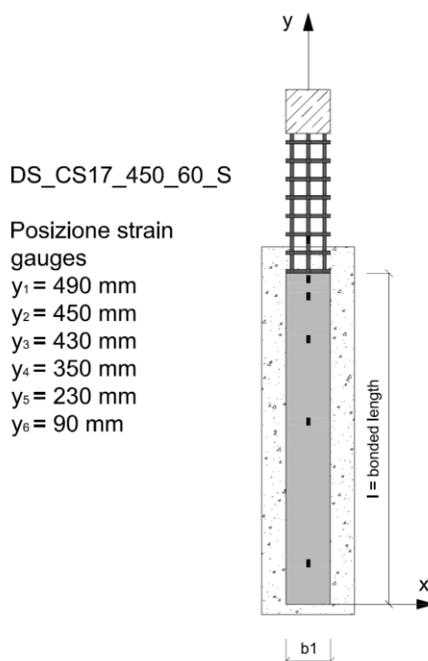


Fig. 5.12 – Prospetto di posizionamento degli strain gauges.

Successivamente si è proceduto a stagnare i contatti dello strain gauges a dei cavetti di piccolo diametro che sarebbero stati connessi alla macchina di prova per l'invio del segnale. Nel punto di giunzione è stato spalmato un sottile strato di smalto, con lo scopo di isolare elettricamente i contatti tra loro per evitare che durante la fase del getto della malta si toccassero e alterassero la resistenza propria dello strain gauges pari a 120 Ohm. (Allegato 5). In totale sono stati applicati 6 strain gauges: 5 direttamente sulla fibra e 1 esterno sulla fibra esterna resinata in corrispondenza del fascio centrale. Durante la fase del getto di malta è stato necessario costruire una struttura che sostenesse tutti i fili connessi agli strain gauges, Fig. 5.11.

La denominazione dei provini con strain gauges è DS\_FMN\_X\_Y\_Z, dove:

- DS = direct shear (prove di taglio diretto);
- F = tipologia della fibra usata (C: carbonio; G: vetro);
- M = malta utilizzata (S: Rock S);
- N = valore numerico riferito alla grammatura della fibra;
- X = lunghezza di incollaggio (l) in mm;
- Y = larghezza di incollaggio ( $b_1$ ) in mm;
- S = presenza di strain gauges
- Z = numero del provino;

Provino	$b_1$ [mm]	L [mm]	Malta	Fibra	Numero di fasci
DS_CS17_100_60_4	60	100	Rock_S	C-NET 170 BL	3
DS_CS17_330_60_4	60	330	Rock_S	C-NET 170 BL	3
DS_GS25_100_55_4	55	100	Rock_S	G-NET 251 BA	3
DS_GS25_200_55_4	55	200	Rock_S	G-NET 251 BA	3

Tab. 5.3 – Provini di recupero.

Provino	$b_1$ [mm]	L [mm]	Malta	Fibra	Numero di fasci
DS_CS17_450_60_S_1	60	450	Rock_S	C-NET 170 BL	3
DS_CS17_450_60_S_2	60	450	Rock_S	C-NET 170 BL	3
DS_CS17_450_60_S_3	60	450	Rock_S	C-NET 170 BL	3

Tab. 5.4 – Provini con gli strain gauges.

### 5.3 PROSPETTO DEI PROVINI ESEGUITI

Vengono qui riassunti in una sola vista tutti i provini di composito FRCM preparati durante tutta la sperimentazione esposta in questo elaborato, si veda Fig. 5.13. Si ricorda che ogni prisma durante la prova di taglio diretto supportava un solo campione FRCM. In rosso si evidenziano in provini con G-NET 251 BA, in blu i provini con C-NET 170 BL, in verde le ulteriori prove per vetro e carbonio e in azzurro i test con strain gauges su carbonio.

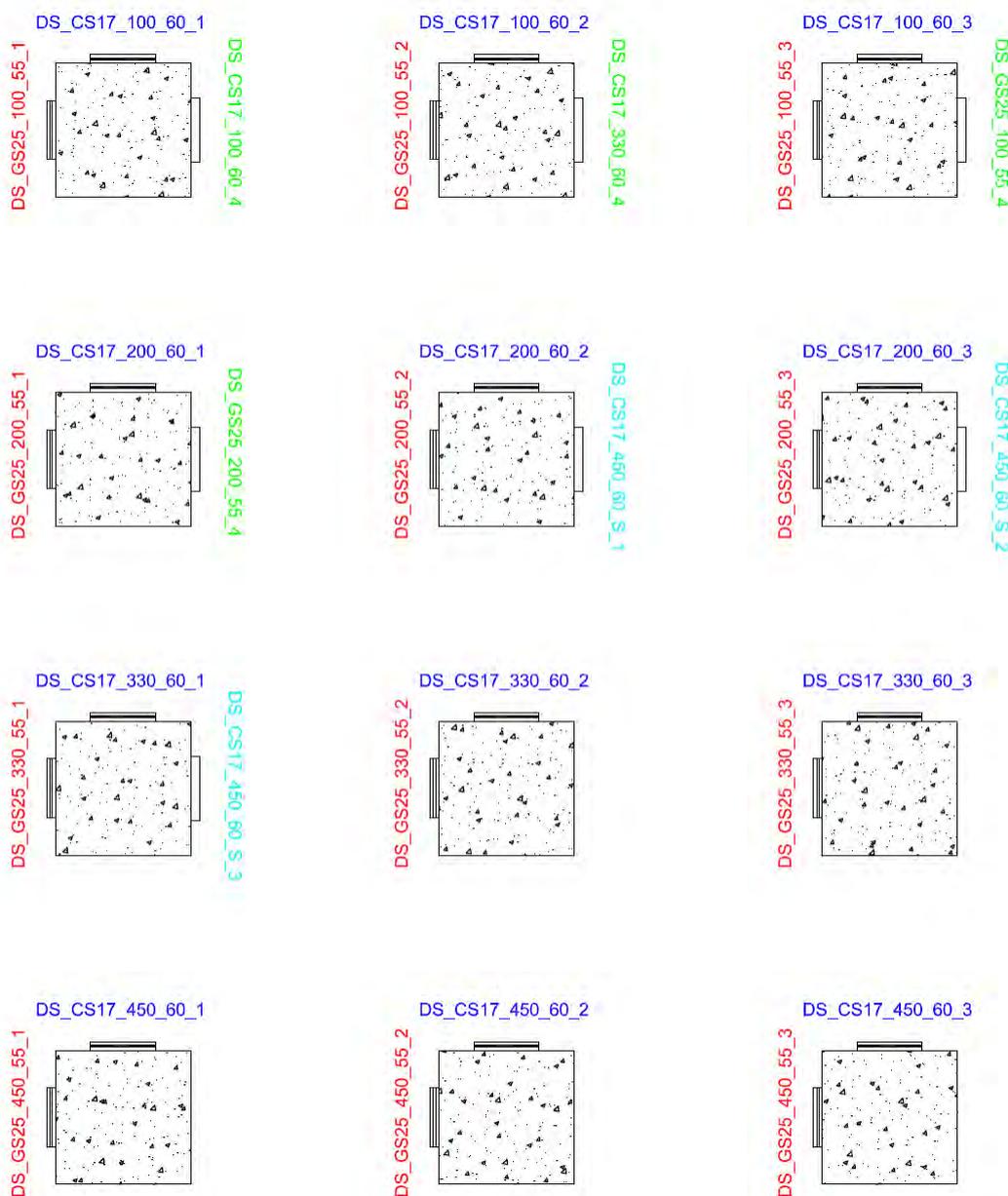


Fig. 5.13 – Prospetto riassuntivo dei provini confezionati nelle tre fasi di prove.

## 5.4 SETUP PER LA PROVA DI TAGLIO DIRETTO

Le prove di taglio diretto su provini di composito FRCM sono state condotte in controllo di spostamento e la modalità di prova eseguita attraverso il sistema classico di push-pull. In particolare la fibra uscente dal provino è stata tirata mentre il provino di calcestruzzo è stato trattenuto. La macchina utilizzata per tale test è una macchina di prova universale Galdabini Sun 60 avente capacità di carico nominale pari a 600 kN e corsa massima della traversa di 1270 mm. Vedere Fig. 5.14



Fig. 5.14 – Macchina universale di prova Galdabini Sun 60

Il provino di calcestruzzo poggia su una piastra d'acciaio vincolata alla testa fissa della macchina, mentre la parte superiore viene racchiusa attraverso una seconda piastra d'acciaio collegata alla base con 4 barre filettate, Fig. 5.15. Tra la piastra superiore e la faccia superiore del provino è stata interposta una piastrina di piombo in modo che il carico derivante dalla trazione sulle fibre non creasse rotture localizzate alla testa del prisma. Le fibre resinate esterne venivano inserite all'interno dei due piatti in acciaio bullonati tra loro e connessi con un giunto a cerniera alla testa mobile della macchina. Le piastrine in alluminio 60x60x2 mm rappresentavano l'interfaccia con cui la fibra esterna era vincolata alle piastre bullonate. Molta attenzione è stata posta all'atto del posizionamento del provino, la direzione di trazione della macchina doveva essere perfettamente in asse con le fibre e con il composito FRCM.

Per quanto riguarda il sistema di acquisizione dati, è stato utilizzato un apparato esterno collegato agli LVDT (linear variable displacement transducer) e alla cella di carico della macchina. Gli LVDT, che formalmente sono delle induttanze variabili, inviavano i dati raccolti al sistema di acquisizione in termini di spostamento. In particolare l'LVDT sinistro e destro leggevano gli spostamenti, quello centrale aveva la doppia funzione di leggere gli spostamenti ma anche di inviare informazioni alla Galdabini sulla velocità di trazione che il provino stava subendo nel punto di distacco. Il sistema così concepito imponeva che la macchina variasse la velocità di spostamento della traversa per compensare le variazioni misurate di velocità nel punto di applicazione degli LVDT. Per verificare l'effettiva velocità di trazione è stato plottato in un grafico, per ogni lunghezza di aderenza, lo spostamento dell'LVDT centrale in funzione del tempo. L'andamento, rettilineo, della funzione esprimeva che la velocità di prova si era mantenuta costante. Per tutte le prove le velocità si sono attestate attorno al valore di 0.0081 mm/s.

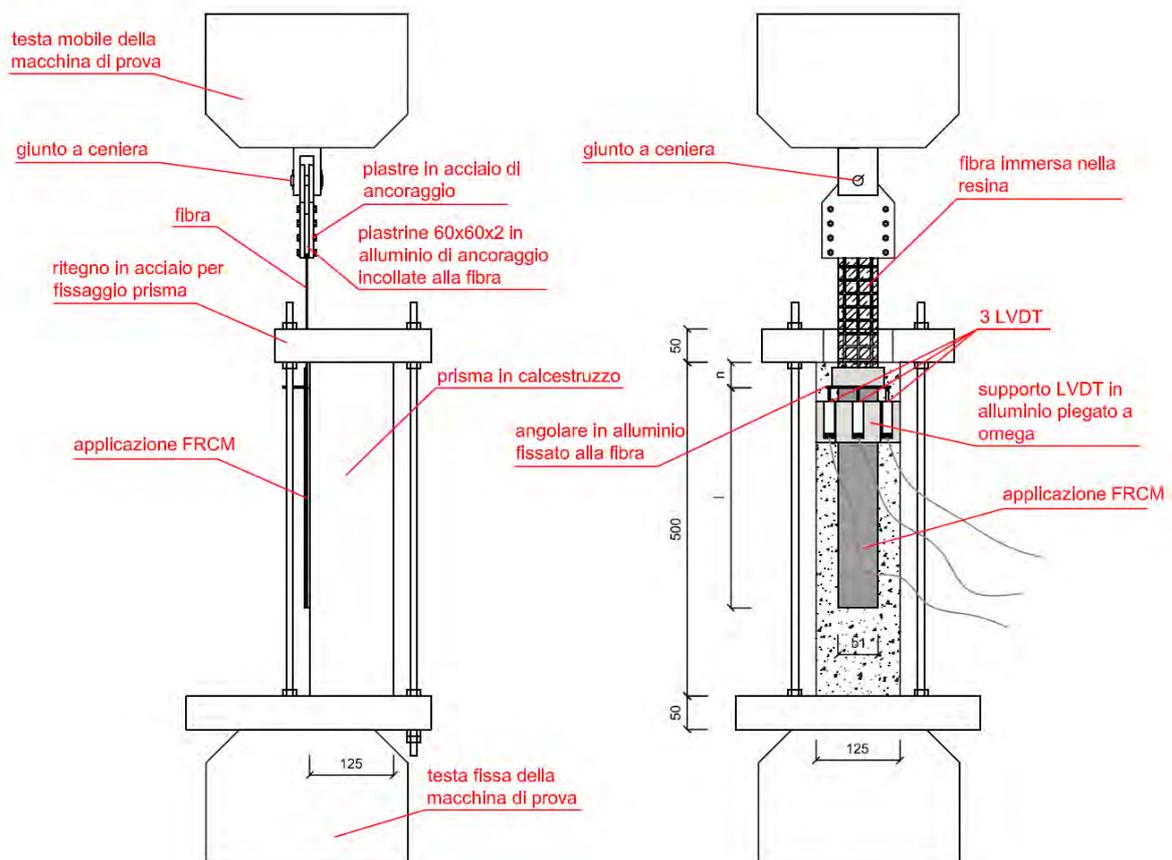


Fig. 5.15 – Schema set-up della prova di taglio diretto.

Per permettere il montaggio e lo smontaggio dei 3 LVDT in modo agevole, è stato studiato un supporto in alluminio che scavalcasse il composito FRCM e si connettesse al prisma in calcestruzzo lateralmente rispetto al composito. I potenziometri misuravano lo spostamento di un angolare in alluminio incollato alle fibre resinare, posto adiacente al bordo del composito FRCM.



*Fig. 5.16 – Foto set-up per la prova di taglio diretto,*

Al termine di ogni prova di taglio diretto, il sistema di ritegno formato dalla piastra superiore, Fig. 5.15, veniva sollevato, le piastre di ancoraggio alla fibra venivano aperte e si poteva cambiare il provino. L'intero supporto degli LVDT si poteva togliere e riapplicare mediante un adesivo termoplastico, poiché montato su un supporto solidale. Gli LVDT utilizzati per questa prova disponevano di una corsa utile pari a 25 mm.

## 5.5 RISULTATI

In questo paragrafo vengono illustrati i risultati ottenuti da tutte le prove di taglio diretto condotte in questa campagna sperimentale. Ad ogni gruppo di prove segue la parte di elaborazione tramite tabelle e grafici.

### 5.5.1 RISULTATI OTTENUTI

#### CARBONIO G-NET 170 BL

##### *SERIE DS\_CS17\_100\_60*

I seguenti provini sono stati confezionati con malta Concrete Rock S per la matrice e fibra di carbonio tipo C\_NET 170 BL per quanto riguarda il materiale resistente. La fibra esterna è stata impregnata con la resina epossidica bicomponente Resin 75, incorporando nel getto anche le piastre di alluminio. La lunghezza di applicazione di questi provini è di 100 mm.

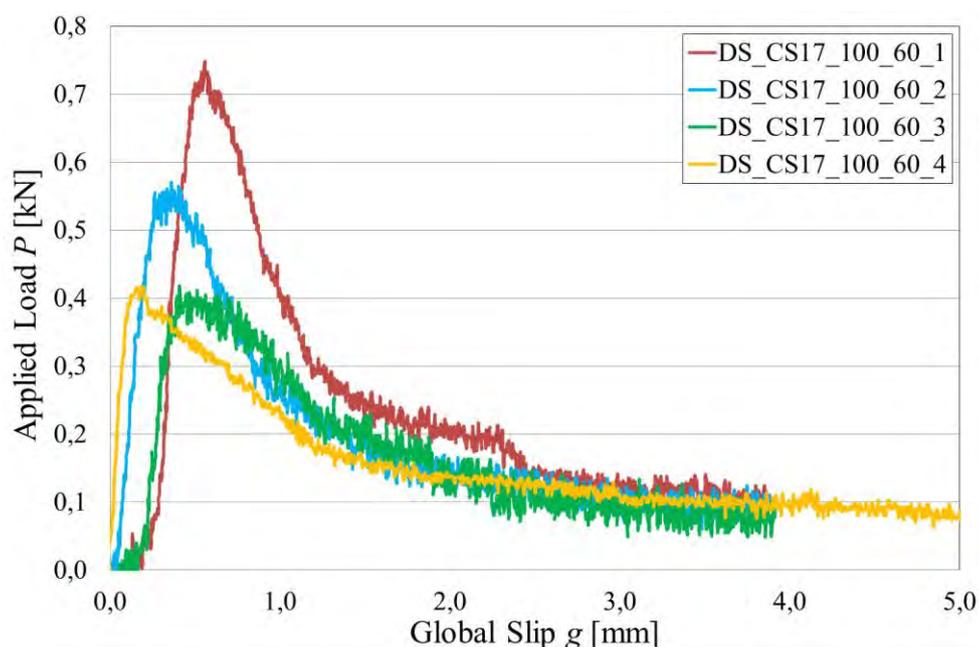


Fig. 5.17 – Risposta di carico per le prove condotte su campioni della serie DS\_CS17\_100\_60.

I carichi massimi raggiunti per questa serie di provini alla prova di taglio diretto sono stati rispettivamente di 0.748 kN, 0.571 kN, 0.419 kN e 0.417 kN. L'ultimo provino testato, il DS\_CS17\_100\_60\_4, è stato prodotto nella terza fase di preparazione dei provini, come recupero, poiché il DS\_CS17\_100\_60\_3 non aveva dato buoni risultati in termini di risposta carico-scorrimento. La risposta carico-scorrimento dei quattro provini viene riportata nel grafico in Fig. 5.17 mentre le modalità di rottura più caratteristiche dei provini vengono presentate Fig. 5.18 e

Fig. 5.19. In tutti i campioni testati di questa serie, si è riscontrato la delaminazione e il conseguente sfilamento delle fibre senza presentare segni di rottura.



Fig. 5.18 – Esito della prova di taglio diretto per il campione DS\_CS17\_100\_60\_1.



Fig. 5.19 – Esito della prova di taglio diretto per il campione DS\_CS17\_100\_60\_2.

**SERIE DS\_CS17\_200\_60**

Per i seguenti provini è stata utilizzata malta Concrete Rock S per la matrice e fibra di carbonio C\_NET 170 BL materiale resistente. I carichi massimi per questa serie di prove sono stati rispettivamente di 0.869 kN, 0.964 kN e 0.762 kN. La lunghezza di applicazione del composito FRCM era di 200 mm. Si riporta la risposta di carico in Fig. 5.20.

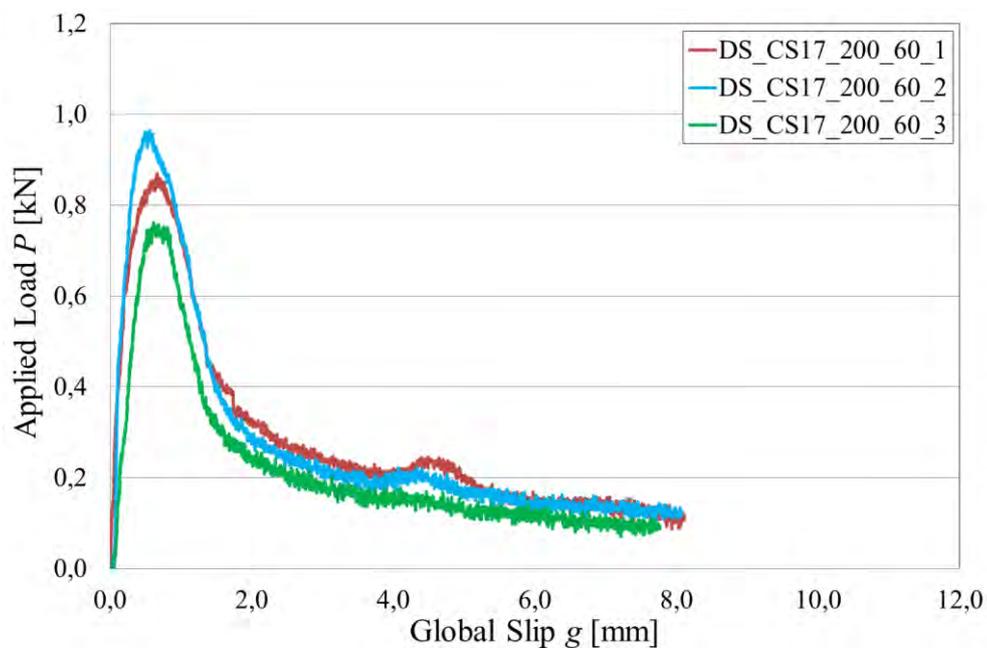


Fig. 5.20 – Risposta di carico per le prove condotte su campioni della serie DS\_CS17\_200\_60.

Durante la prova di taglio diretto il provino DS\_CS17\_200\_60\_1 e DS\_CS17\_200\_60\_2 hanno mostrato un collasso in cui è visibile una rottura della matrice nella parte superiore Fig. 5.21 e Fig. 5.22. Si è considerato che ciò potesse essere legato al fatto che durante la resinatura della fibra esterna, la matrice avesse potuto assorbire della resina, portando ad avere un trasferimento della trazione durante la prova di taglio diretto anche attraverso la matrice stessa.



Fig. 5.21 – Esito della prova di taglio diretto sul campione DS\_CS17\_200\_60\_1.



Fig. 5.22 – Esito della pro di taglio diretto sul campione DS\_CS17\_200\_60\_2.



Fig. 5.23 – Esito della prova di taglio diretto sul campione DS\_CS17\_200\_60\_3.

In tutti i campioni si è verificata la delaminazione della fibra all'interfaccia fibra-matrice determinandone così lo scorrimento dei fasci all'interno della matrice stessa.

Tutte le successive prove con il carbonio sono state condotte con provini confezionati con rete di carbonio C-NET 170 BL e matrice realizzata con Concrete Rock S.

**SERIE DS\_CS17\_330\_60**

Per questa serie di prove i carichi massimi ottenuti dalla prova di taglio diretto sono stati rispettivamente 1.571 kN, 1.583 kN, 1.234 kN e 1.639 kN. In questa serie di prove è stato testato un campione di recupero (DS\_CS17\_330\_60\_4) in quanto il provino DS\_CS17\_330\_60\_3 non ha dato una risposta di carico adeguata. Nel grafico vengono riportate tutte e quattro le risposte di carico. La lunghezza di applicazione del composito FRCM per questi provini era di 330 mm.

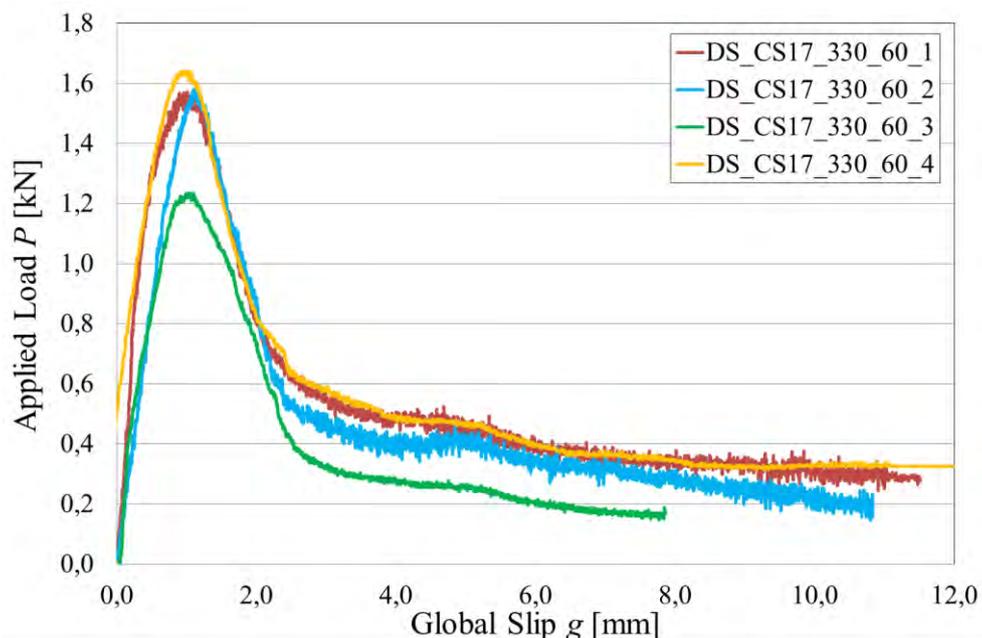


Fig. 5.24 – Risposta di carico per le prove condotte su campioni della serie DS\_CS17\_330\_60.

Vengono mostrate le modalità di rottura caratteristiche di questa serie di campioni, Fig. 5.25. In particolare, in Fig. 5.27 è possibile notare come la rottura sia avvenuta principalmente per scorrimento della fibra ma denotando una rottura con comportamento telescopico [7], in quanto le fibre esterne risultano spezzate mentre quelle interne ad ogni fascio non presentano alcun danno apparente. Il campione DS\_CS17\_330\_60\_3 ha fornito un valore di carico di picco significativamente più basso rispetto agli altri campioni, il motivo di tale differenza potrebbe essere dovuto alla non buona impregnazione della fibra con la matrice. Questo avrebbe portato ad avere una aderenza inferiore nell'interfaccia fibra-matrice, permettendo lo scorrimento delle fibre ad un valore di carico più basso.



Fig. 5.25 – Esito prova di taglio diretto sul campione DS\_CS17\_330\_60\_2.



Fig. 5.26 – Esito della prova a taglio diretto su provino DS\_CS17\_330\_60\_4.



Fig. 5.27 – Particolare di rottura della fibra nel campione DS\_CS17\_330\_60\_3.

**SERIE DS\_CS17\_450\_60**

In questa serie di campioni, i valori di carico massimo sono stati rispettivamente 1.711 kN, 1.847 kN e 1.541 kN. La lunghezza di applicazione di composito FRCM per questo set di provini era di 450 mm.

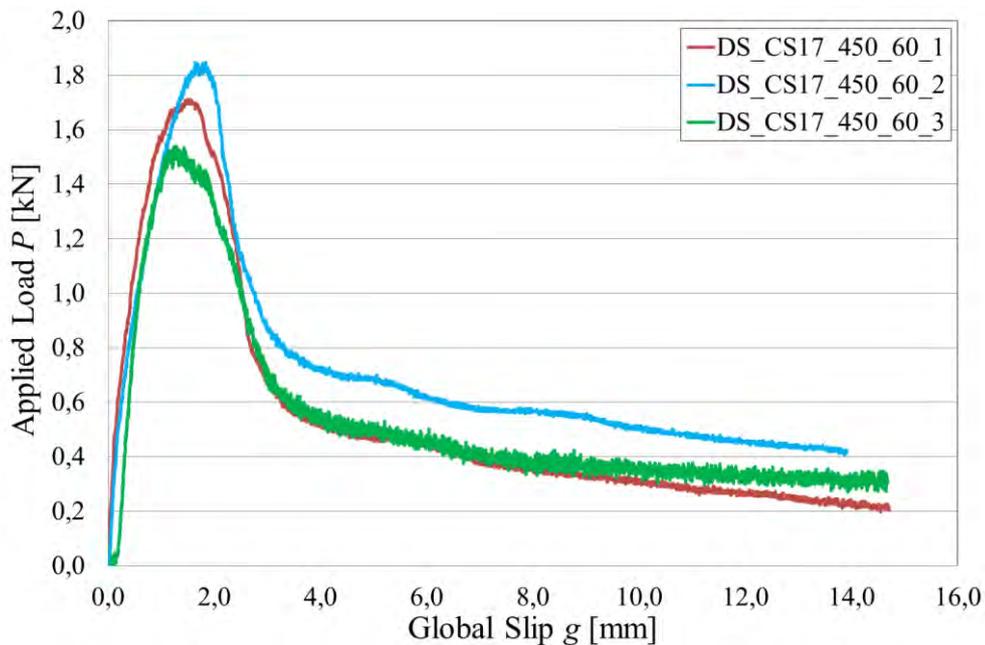


Fig. 5.28 - Risposta di carico per le prove condotte su campioni della serie DS\_CS17\_450\_60

Si seguito vengono riportate le modalità di rottura dei tre provini per questa serie di prove, si veda Fig. 5.29, Fig. 5.30 e Fig. 5.31.

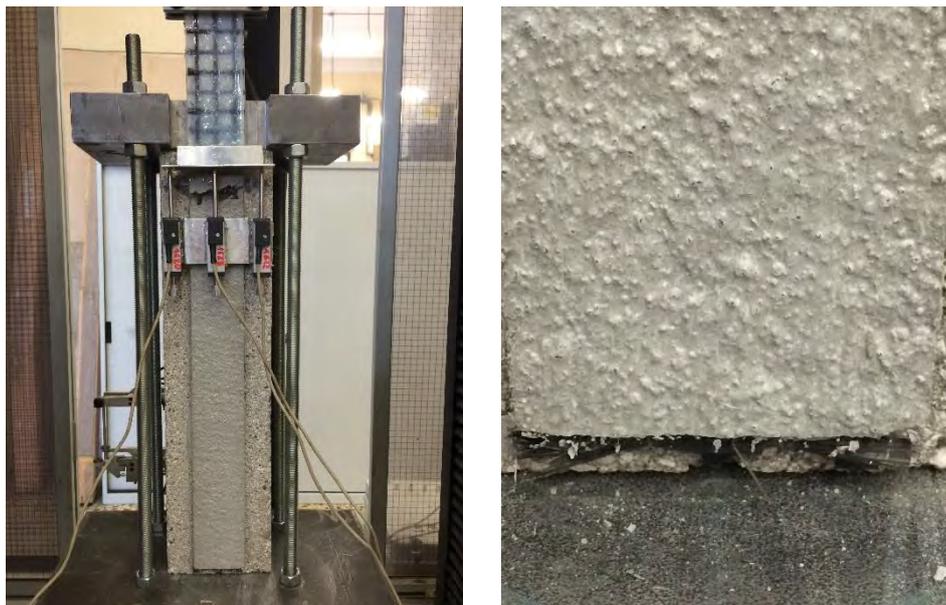


Fig. 5.29 – Esito prova di taglio diretto sul campione DS\_CS17\_450\_60\_1, particolare delle fibre.

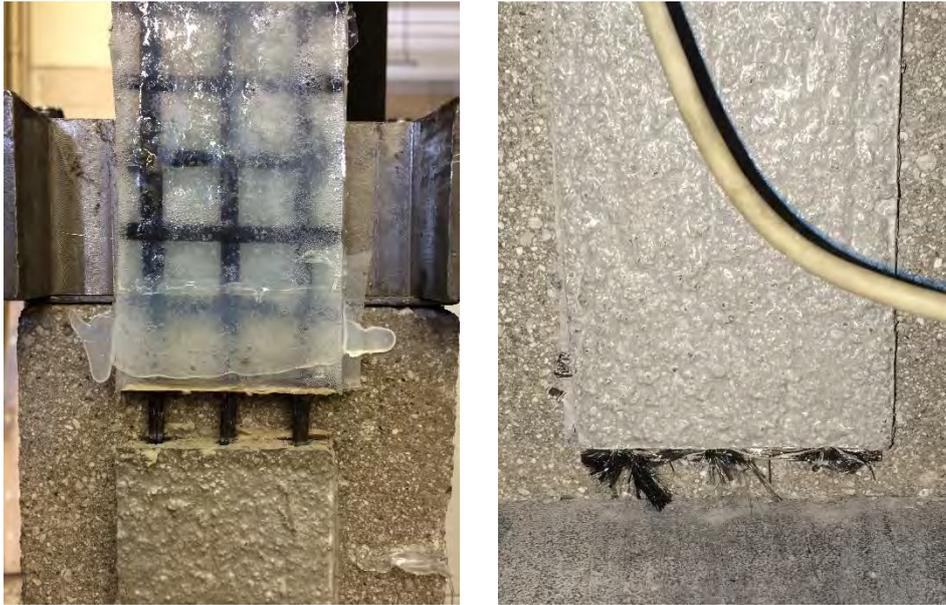


Fig. 5.30 – Esito della prova di taglio diretto sul campione DS\_CS17\_450\_60\_2, particolare delle fibre.

In tutti i casi i tre fasci di fibra che costituivano il composito si sono delaminati dalla malta e sono andati in contro ad uno scorrimento senza danneggiamento della matrice. Da notare che nella parte bassa di ogni provino, foto a destra di ogni gruppo di foto, alcune fibre si sono raccolte senza entrare nella matrice. Ciò ha portato a considerare che siano le fibre esterne del fascio ad essere rimaste aderenti alla matrice, mentre quelle interne, meno impregnate dalla malta, siano slittate. Questo comportamento porta a considerare la rottura di tipo telescopico [7].



Fig. 5.31 – Esito della prova a taglio diretto sul campione DS\_CS17\_450\_60\_3, particolare delle fibre.

## CONCLUSIONI GRUPPO C-NET 170 BL

Si riportano i dati raccolti da questo gruppo di prove con la fibra C-NET 170 BL e malta Rock S. Nella tabella seguente.

Provino	L [mm]	P* [kN]	Avg [kN]
DS_CS17_100_60_1	100	0,748	0,54
DS_CS17_100_60_2	100	0,571	
DS_CS17_100_60_3	100	0,419	
DS_CS17_100_60_4	100	0,417	
DS_CS17_200_60_1	200	0,869	0,87
DS_CS17_200_60_2	200	0,964	
DS_CS17_200_60_3	200	0,762	
DS_CS17_330_60_1	330	1,571	1,60
DS_CS17_330_60_2	330	1,583	
DS_CS17_330_60_3	330	1,234	
DS_CS17_330_60_4	330	1,639	
DS_CS17_450_60_1	450	1,711	1,70
DS_CS17_450_60_2	450	1,847	
DS_CS17_450_60_3	450	1,541	

Tab. 5.5 – Tabella riassuntiva dei carichi massimi ottenuti dalle prove di taglio diretto per il gruppo di prove con fibra C-NET 170 BL e matrice Rock S.

Scartando i valori troppo diversi, si è calcolata la media dei carichi di picco  $P^*$  ottenuti in ogni serie, ovvero per ogni lunghezza di applicazione  $l$ . Ad ogni valore medio è stata associata la lunghezza a cui si riferisce, il tutto è stato elaborato in un grafico con una spezzata che congiunge i valori medi al variare della lunghezza. Fig. 5.32.

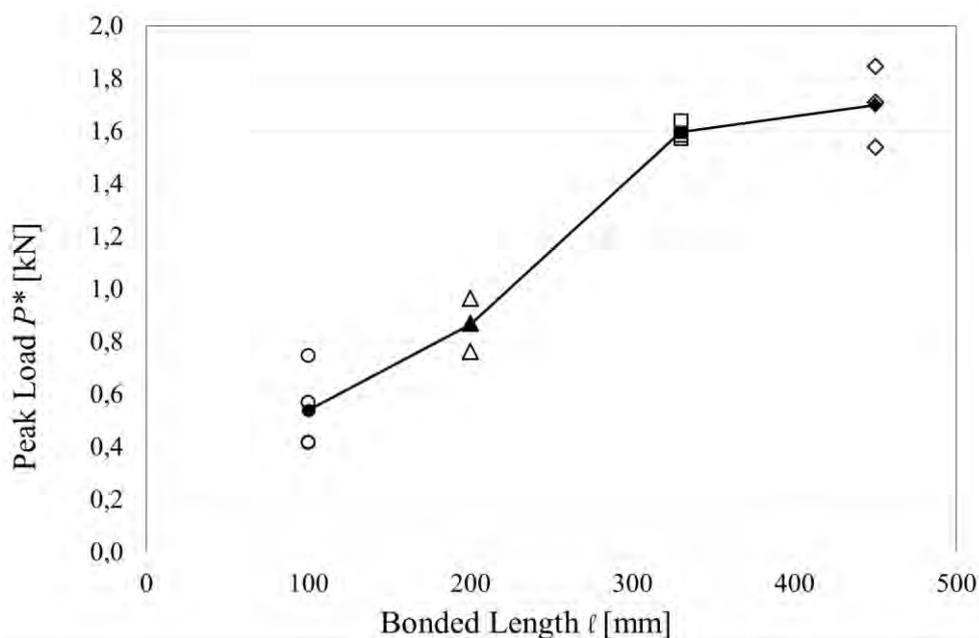


Fig. 5.32 – Andamento del carico in funzione della lunghezza di incollaggio per C-NET 170 BL (length effect).

Per ogni valore di carico ottenuto dalle prove è stata poi ricavata la tensione normale  $\sigma^*$  a cui i le fibre erano sottoposte, il tutto viene riportato in Tab. 5.6. Il calcolo della tensione è stato effettuato mediante la formula seguente.

$$\sigma^* = \frac{P^*}{n \cdot A_{fascio}}$$

Dove  $P^*$  è il carico di picco,  $n$  è il numero di fasci presenti nel composito, valore che in questa sperimentazione è sempre stato pari a 3, e  $A_{fascio}$  che rappresenta la sezione effettiva del singolo fascio di fibre. Per il calcolo della sezione della fibra si veda § 4.3.1.

Provino	Lunghezza [mm]	$P^*$ [kN]	$\sigma^*$ [MPa]	Coefficiente di sfruttamento
DS_CS17_100_60_1	100	0,748	265	0,21
DS_CS17_100_60_2	100	0,571	202	0,16
DS_CS17_100_60_3	100	0,419	148	0,12
DS_CS17_100_60_4	100	0,417	148	0,12
DS_CS17_200_60_1	200	0,869	308	0,24
DS_CS17_200_60_2	200	0,964	342	0,27
DS_CS17_200_60_3	200	0,762	270	0,21
DS_CS17_330_60_1	330	1,571	557	0,44
DS_CS17_330_60_2	330	1,583	562	0,45
DS_CS17_330_60_3	330	1,234	438	0,35
DS_CS17_330_60_4	330	1,639	581	0,46
DS_CS17_450_60_1	450	1,711	607	0,48
DS_CS17_450_60_2	450	1,847	655	0,52
DS_CS17_450_60_3	450	1,541	546	0,43
Resistenza media C-NET 170 BL [MPa]			1261	

Tab. 5.6 – Tabella riassuntiva dei carichi di picco di goni provino e delle relative tensioni rapportate alla resistenza della fibra C-NET 170 BL.

Nella tabella si è anche calcolato un particolare coefficiente, ricavato dal rapporto tra la tensione alla quale i fasci erano sottoposti durante la prova di taglio diretto e la tensione massima raggiunta dalla fibra durante il test eseguito sul carbonio ed esposte nel capitolo precedente.

Tale valore risulta indicativo in quanto è possibile capire quanto la fibra, in termini tensionali, sia sfruttata nel meccanismo resistente di aderenza nel composito FRCM testato. Nel caso in esame la sollecitazione, a cui la fibra è stata sottoposta nei test con la lunghezza di aderenza più alta, non arriva ad essere il 50% della resistenza ultima caratteristica di tale fibra (C-NET 170 BL). Questo dato ci porta a considerare che il tipo di fibra utilizzata in questo gruppo di prove non sviluppi un elevato grado di aderenza con la matrice utilizzata, il che induce a pensare che l'impregnazione della fibra di carbonio C-NET 170 BL con la matrice Rock S non sia ottimale.

**SERIE DS\_CS17\_450\_60\_S**

In questa serie di prove sono stati testati i campioni dotati di strain gauges ancorati al fascio centrale della rete di carbonio. Il campione, a meno della presenza degli strain gauges, era identico a quelli della serie DS\_CS17\_450\_60. Per ogni campione viene presentato il comportamento della risposta di carico con indicato, attraverso delle lettere, i punti di carico-spostamento per i quali sono stati plottati gli andamenti delle deformazioni.

**DS\_CS17\_450\_60\_S\_1**

Il valore di carico massimo sviluppato durante la prova è stato di 1.171 kN. La lunghezza di applicazione del composito FRCM era pari a 450 mm.

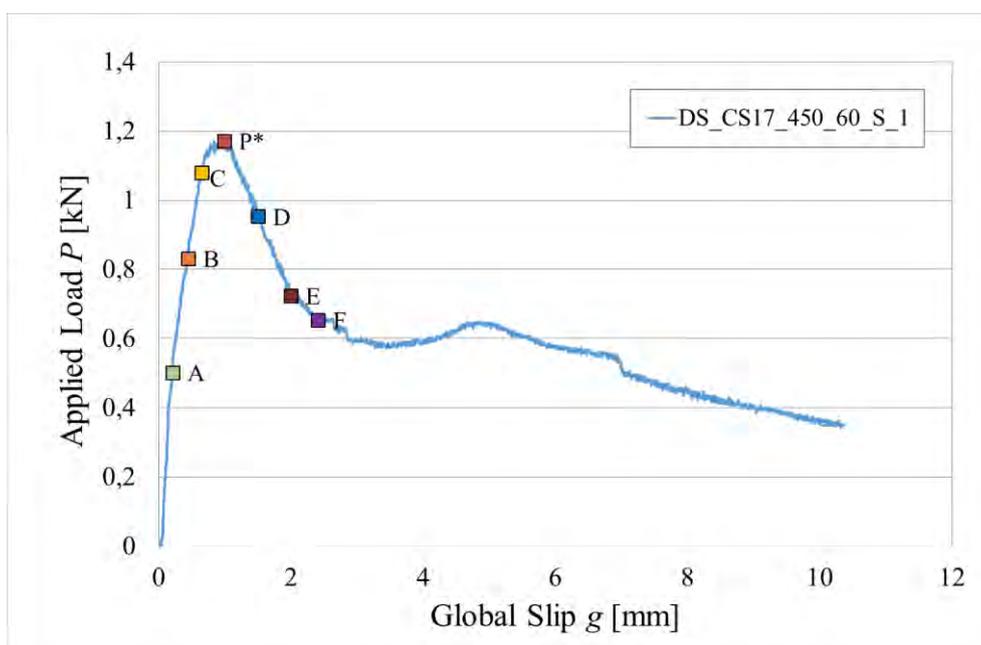


Fig. 5.33 – Risposta di carico per la prova di taglio diretto condotta sul campione DS\_CS17\_450\_60\_S\_1.



Fig. 5.34 – Setup di prova di taglio diretto e particolare cablaggio strain gauge nel pacchetto fibra-resina esterno, campione DS\_CS17\_450\_60\_S\_1.

Nella Fig. 5.34 è possibile osservare il particolare setup modificato per eseguire la prova con l'inserimento del sistema di acquisizione degli strain gauges. Data la vicinanza del primo strain gauge al bordo del composito è stato necessario tagliare una porzione dell'angolare in alluminio per permettere il passaggio dei cavi di collegamento.

Di seguito vengono mostrate le modalità di rottura del campione in questione. È ben visibile lo scorrimento della fibra con una successiva separazione dello strato superiore di malta, Fig. 5.35

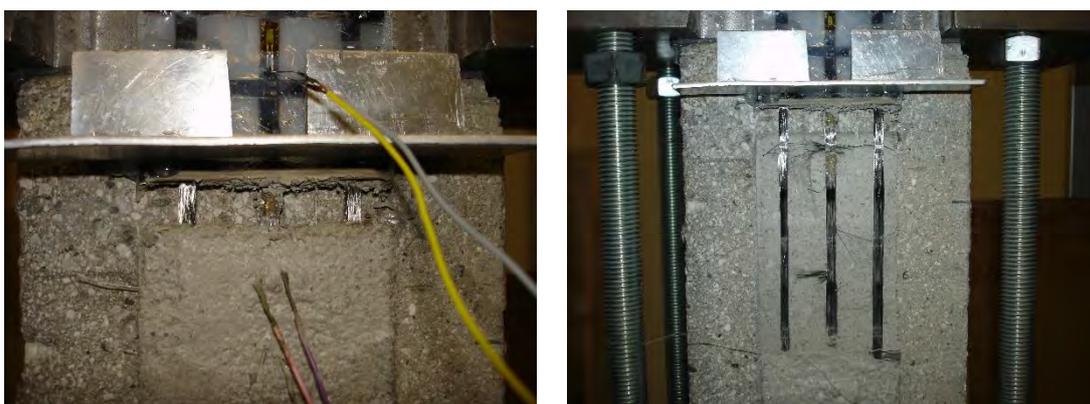


Fig. 5.35 – Esito della prova di taglio diretto; particolare relativo alla delaminazione matrice esterna.

Vengono riportati i valori, Tab. 5.7, delle deformazioni relative ai carichi scelti per l'analisi, indicati dai punti contrassegnati con una lettera in Fig. 5.33.

	Carico [kN]	Spostamento [mm]	Deformazioni strain gauges [ $\mu\epsilon$ ]					
			SG1 (490 mm)	SG2 (450 mm)	SG3 (430 mm)	SG4 (350 mm)	SG5 (230 mm)	SG6 (90 mm)
P*	1,171	0,996	2005	1688	2933	3213	2933	426
A	0,502	0,211	1124	767	2052	2094	171	2
B	0,832	0,442	1633	1310	2622	2979	1412	79
C	1,080	0,650	1947	1751	3018	3395	1840	592
D	0,953	1,505	1812	1532	2713	2697	1001	27
E	0,724	2,000	1568	1453	2518	2117	356	-312
F	0,654	2,415	1479	1332	2362	1787	511	-710

Tab. 5.7 – Valori delle deformazioni al variare di carichi per il campione DS\_CS17\_450\_60\_S\_1.

Lo strain gauge SG1 è applicato al di fuori del composito FRCCM, in particolare è stato connesso alla resina che ricopriva le fibre esterne in corrispondenza alla fibra centrale.

Questi valori sono stati poi elaborati per via grafica, l'andamento ottenuto è visibile in Fig. 5.36. In ordinata vengono riportati i valori di deformazioni in *microstrain*, mentre nell'asse delle ascisse si riporta la distanza dello strain gauge dalla base dell'applicazione del composito FRCCM, si veda Fig. 5.12.

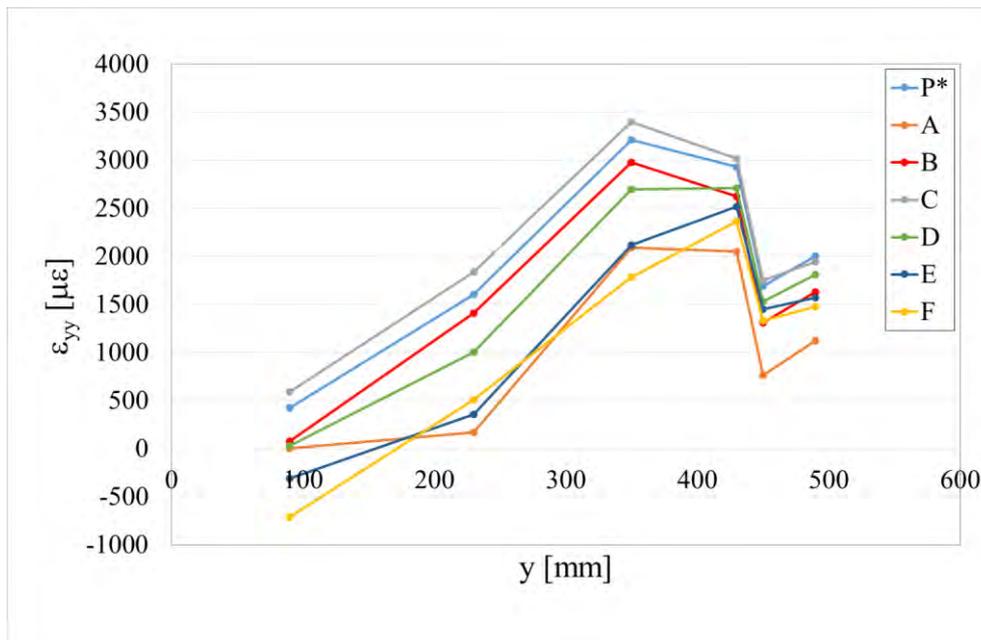


Fig. 5.36 – Andamento delle deformazioni assiali per la fibra centrale a diversi valori di carico per il campione DS\_CS17\_450\_60\_S\_1.

Si noti come in fase di carico la parte di fibra nella zona opposta a quella di carico sia quasi indeformata, successivamente durante il processo di trazione della prova di taglio diretta anche quella porzione di fibra comincia a subire gli effetti della deformazione. Particolare è il fatto di avere valori di deformazione negativi. Questo aspetto potrebbe essere legato ad una leggera compressione dello strain gauges causato dalla matrice in fase di scorrimento da parte della fibra.

*DS\_CS17\_450\_60\_S\_2*

Per questo secondo campione dotato di strain gauges il carico Massimo ottenuto durante la prova di taglio diretto è stato pari a 1.269 kN. La lunghezza di applicazione del composito era pari a 450 mm.

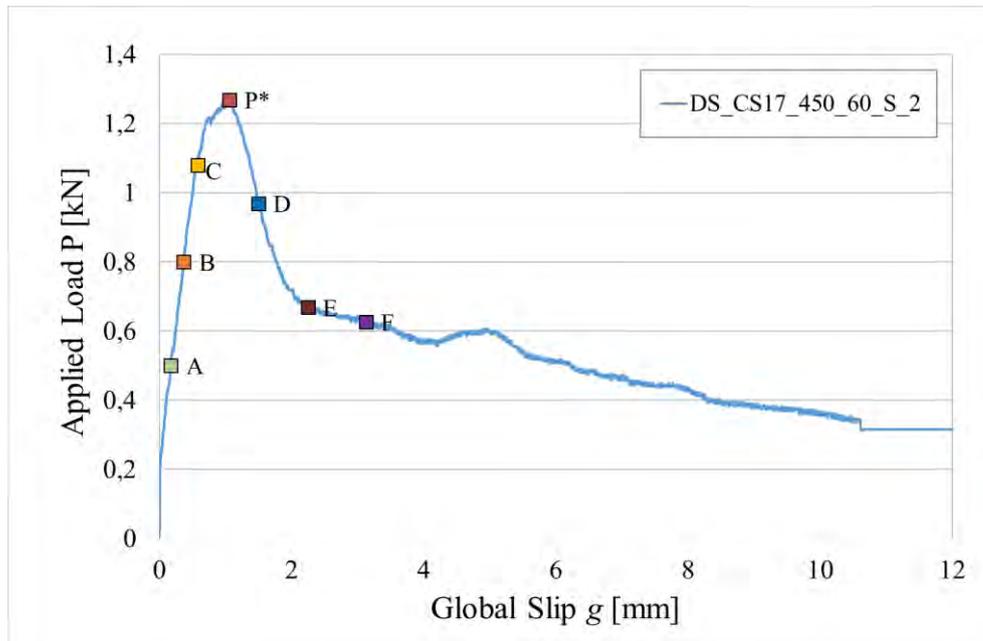


Fig. 5.37 – Risposta di carico per la prova di taglio diretto condotta sul campione DS\_CS17\_450\_60\_S\_2.

Vengono mostrate le modalità di collasso del provino. Il campione in esame evidenzia un evidente scorrimento da parte delle fibre all'interno della matrice Fig. 5.38. A differenza del DS\_CS17\_540\_60\_S\_1, in questo caso la matrice non si è distaccata ed è rimasta compatta.



Fig. 5.38 – Esito della prova di taglio diretto sul campione DS\_CS17\_450\_60\_S\_2.

Si riportano in tabella Tab. 5.8 i valori delle deformazioni per alcuni valori particolari di carico P, tra cui il carico massimo P\* della prova di taglio diretto.

	Carico [kN]	Spostamento [mm]	Deformazioni strain gauges [ $\mu\epsilon$ ]					
			SG1 (490 mm)	SG2 (450 mm)	SG3 (430 mm)	SG4 (350 mm)	SG5 (230 mm)	SG6 (90 mm)
P*	1,269	1,063	1590	2721	4071	2736	2635	624
A	0,501	0,173	733	841	2870	1167	104	3
B	0,800	0,371	1090	1382	3452	1753	1674	5
C	1,080	0,577	1424	1908	3877	2308	2347	255
D	0,970	1,501	1322	2266	3365	2087	1800	365
E	0,669	2,250	1089	2325	3121	1650	824	372
F	0,627	3,131	1074	2399	3285	1991	-15	351

Tab. 5.8 – Valori delle deformazioni al variare dei carichi per il campione DS\_CS17\_450\_60\_S\_2.

Si ricorda che lo strain gauges SG1 è esterno alla matrice ed è applicato sulla resina in corrispondenza della fibra centrale.

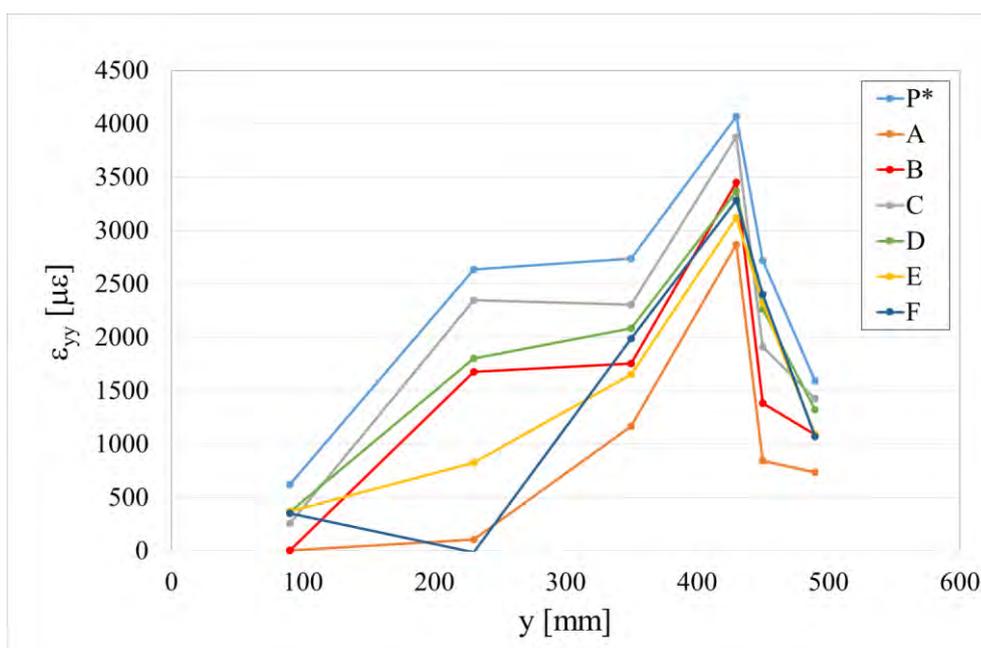


Fig. 5.39 – Andamento delle deformazioni assiali per la fibra centrale a diversi valori di carico per il campione DS\_CS17\_450\_60\_S\_2.

DS\_CS17\_450\_60\_S\_3

Per il terzo campione dotato di strain gauges il carico massimo registrato durante la prova di taglio diretto è stato pari a 1.540 kN. La lunghezza di applicazione del composito FRM è era di 450 mm.

Viene mostrata la risposta di carico Fig. 5.40, in cui vengono evidenziati i carichi, mediante una lettera per i quali sono state valutate le deformazioni ricavate dagli strain gauges.

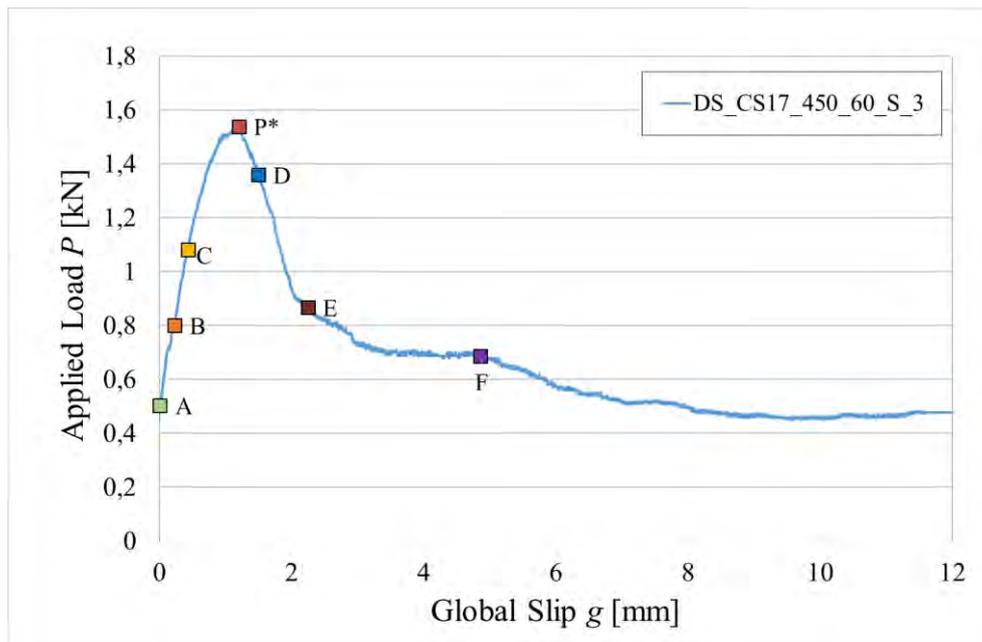


Fig. 5.40 - Risposta di carico per la prova di taglio diretto condotta sul campione DS\_CS17\_450\_60\_S\_3.

Di seguito vengono mostrate le modalità di rottura del campione in esame. Si nota, come per il campione DS\_CS17\_450\_60\_S\_1, che la rottura è avvenuta principalmente attraverso lo scorrimento delle fibre e che lo strato di matrice esterna si è distaccato. Altro particolare interessante è attribuibile al danneggiamento della fibra centrale, ciò potrebbe essere stato causato dalla presenza dello strain gauges, Fig. 5.41.



Fig. 5.41 –Esito della prova di taglio diretto sul campione DS\_CS17\_450\_60\_S\_3.

Nonostante lo scorrimento dei fasci è evidente l’accumulo di fibre nella parte inferiore. Questo fenomeno porta a considerare la presenza di un effetto telescopico nella rottura. Fig. 5.42

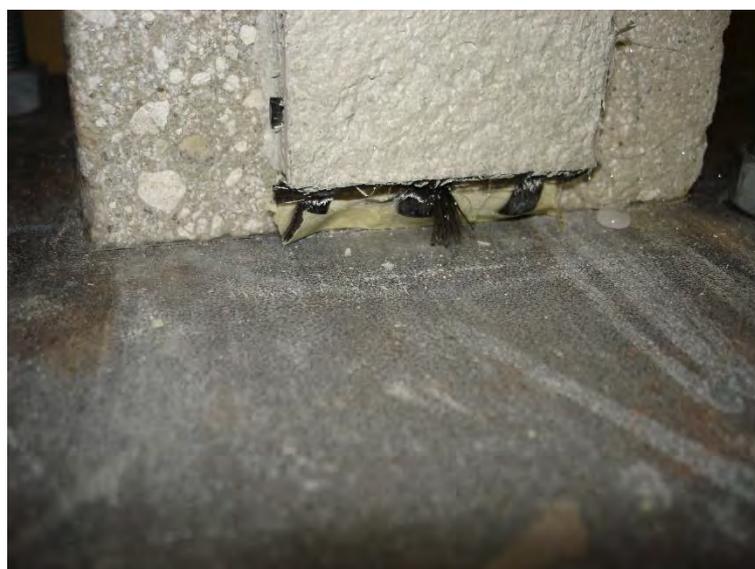


Fig. 5.42 – Esito prova di taglio diretto, particolare della fibra tirata all’interno della matrice, campione DS\_CS17\_450\_60\_S\_3.

	Carico [kN]	Spostamento [mm]	Deformazioni strain gauges [ $\mu\epsilon$ ]					
			SG1 (490 mm)	SG2 (450 mm)	SG3 (430 mm)	SG4 (350 mm)	SG5 (230 mm)	SG6 (90 mm)
P*	1,540	1,203	2751	2796	3523	3575	2197	591
A	0,504	0,008	1337	586	1437	671	27	2
B	0,801	0,227	1821	1082	1953	1391	573	3
C	1,082	0,437	2205	1562	2422	2001	1262	27
D	1,360	1,500	2644	2801	3489	3675	1951	397
E	0,868	2,250	2095	1686	2314	2703	648	-317
F	0,687	4,861	1918	1954	2131	2175	1553	-772

Tab. 5.9 – Valori delle deformazioni al variare del carico per il campione DS\_CS17\_450\_60\_S\_3.

Si ricorda che lo strain gauges SG1 è esterno alla matrice e applicato sulla resina in corrispondenza della fibra centrale.

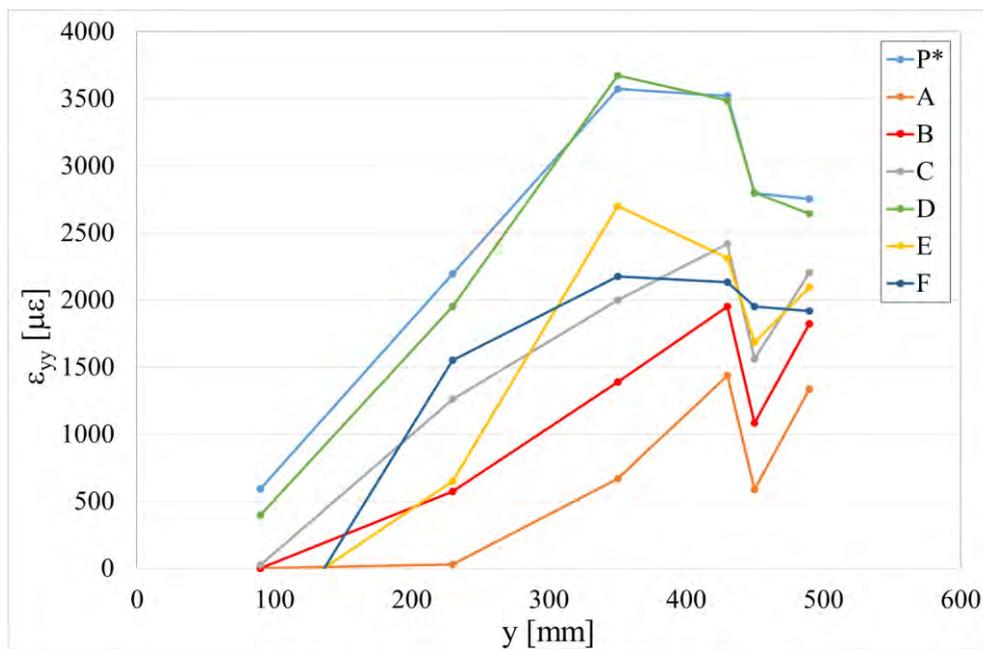


Fig. 5.43 – Andamento delle deformazioni assiali per la fibra centrale a diversi valori di carico per il campione DS\_CS17\_450\_60\_S\_3.

## G-NET 251 BA

### ***SERIE DS\_GS25\_100\_55***

I materiali utilizzati per questa serie di prove sono stati la fibra di vetro tipo G-NET 251 BL e per matrice la malta Concrete Rock S.

I valori di carico massimo ottenuto in questa serie di provini sono stati rispettivamente 0.476 kN, 0.803 kN, 0.634 kN e 0.632 kN. Per questo set di prove è stato aggiunto una prova di recupero in quanto il DS\_GS25\_100\_55\_1 non ha dato risultati soddisfacenti in termini di risposta di carico. La lunghezza di applicazione del materiale composito era di 100 mm.

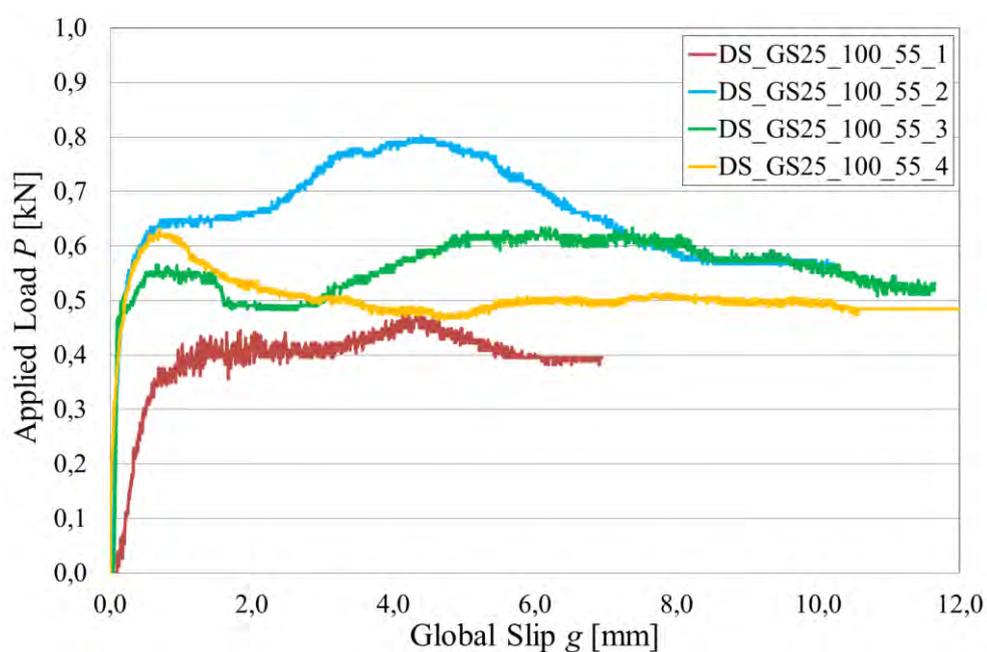


Fig. 5.44 - Risposta di carico per le prove condotte su campioni della serie DS\_GS25\_100\_55.

Osservando il grafico, la risposta di carico non segue l'andamento definito in Fig. 3.17 ma si raggiunge un sorta di valore di picco per poi stabilizzarsi in termini di carico e si vede aumentare lo spostamento, generato dallo scorrimento delle fibre.

Le principali modalità di rottura sono mostrate nelle immagini in Fig. 5.45. È interessante notare come per lunghezze di applicazione basse la rottura avvenga anche in questo caso, come per il carbonio, per delaminazione delle fibre dalla matrice, senza danno apparente alla matrice o distacco dal prisma di calcestruzzo. Lo scorrimento delle fibre è ben visibile in Fig. 5.46.

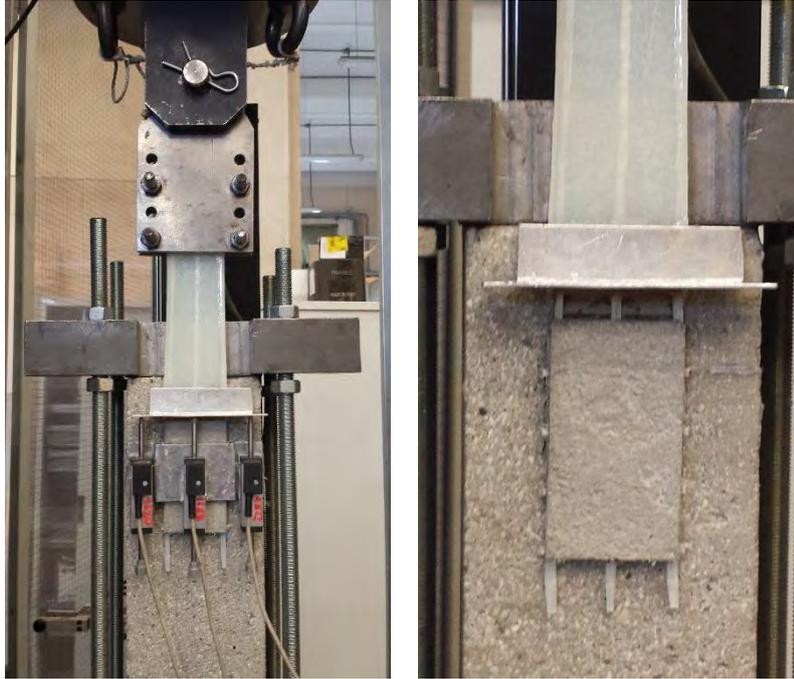


Fig. 5.45 - Setup di prova e esito della prova di taglio diretto per il campione DS\_GS25\_100\_55\_2.



Fig. 5.46 – Esito della prova di taglio diretto su provino DS\_GS25\_100\_55\_4.

**SERIE DS\_GS25\_200\_55**

I valori di carico massimo ottenuti da questa serie di prove sono stati rispettivamente di 0.668 kN, 1.245 kN, 1.031 kN e 1.261 kN. Anche per questa serie si è deciso di preparare un campione di recupero in quanto la prova di taglio diretto sul campione DS\_GS25\_200\_55\_1 non ha dato valori di carico adeguati. La lunghezza di applicazione dei campioni di composito FRCM era di 200 mm.

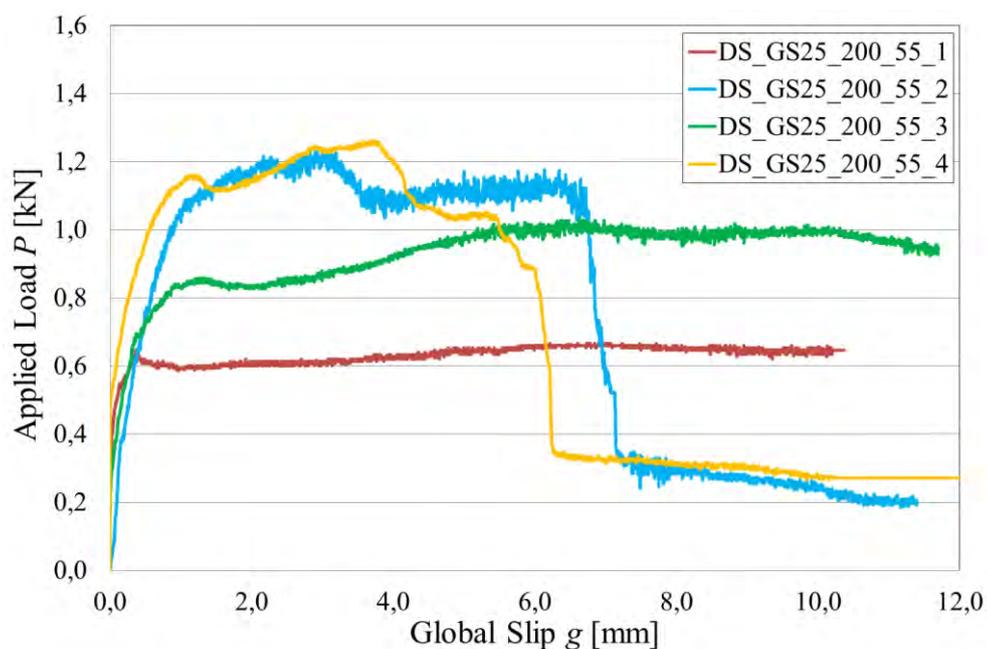


Fig. 5.47 – Risposta di carico per le prove condotte su campioni della serie DS\_GS25\_200\_55.

In questa serie di prove si notano le prime differenze in termini di risposta di carico rispetto a quelle descritte in precedenza. I provini DS\_GS25\_200\_55\_1 e DS\_GS25\_200\_55\_3 mostrano un comportamento analogo a quelli della serie precedente, mentre il DS\_GS25\_200\_55\_2 e DS\_GS25\_200\_55\_4 presentano una caduta brusca in termini di carico tra 6 e 7 mm di spostamento. Questo fenomeno è imputabile alla rottura di alcune fibre, in particolare Fig. 5.48 e Fig. 5.49 si evidenzia come la rottura del campione è avvenuta per scorrimento dei fasci laterali e rottura di quello centrale. Diversamente per il provino numero \_3, si ha lo scorrimento dei tre fasci, comportamento compatibile alla risposta di carico relativo, Fig. 5.47.



Fig. 5.48 – Esito della prova a taglio diretto sul campione DS\_GS25\_200\_55\_2.



Fig. 5.49 – Esito della prova a taglio diretto sul campione DS\_GS25\_200\_55\_4.

Nel campione DS\_GS25\_200\_55\_4 si individua una rottura tra la matrice e la resina, analizzando meglio il meccanismo di collasso si nota che c'è stato uno sfilacciamento delle singole fibre del fascio centrale avvenuto perlopiù all'interno della resina che rivestiva la fibra esterna.



Fig. 5.50 – Esito della prova di taglio diretto sul campione DS\_GS25\_200\_55\_3.

**SERIE DS\_GS25\_330\_55**

I valori massimi di carico ottenuti in questa serie di campioni sono rispettivamente di 1.759 kN, 1.714 kN e 1.984 kN. La lunghezza di applicazione del composito FRCM era di 330 mm.

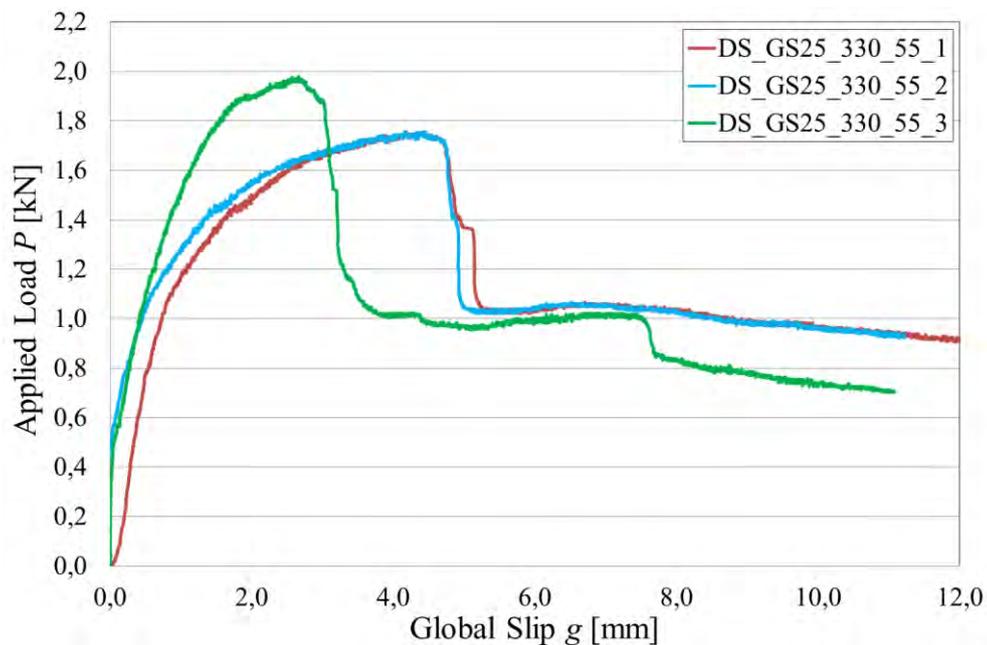


Fig. 5.51 – Risposta di carico per le prove condotte su campioni della serie DS\_GS25\_330\_55.

Dalla risposta di carico dei provini di questa serie si evidenzia in modo più marcato la caduta di carico attorno ad un valore di spostamento tra i 3 e i 5 mm. Questo fenomeno è chiaramente connesso alla rottura delle fibre durante la prova di taglio diretto. Di seguito vengono mostrati gli effetti della prova di taglio diretto sui 3 campioni in esame. Risulta evidente che nel primo e nel terzo la rottura avvenga nella fibra centrale, mentre nel secondo in un primo momento una fibra si rompe ma continuando la trazione tutte e tre le fibre scorrono all'interno della matrice.



Fig. 5.52 – Esito della prova di taglio diretto sul campione DS\_GS25\_330\_1.



Fig. 5.53 – Esito della prova di taglio diretto sul campione DS\_GS25\_330\_2.



Fig. 5.54 – Esito della prova di taglio diretto sul campione DS\_GS25\_330\_3.



Fig. 5.55 – Particolare della rottura del fascio centrale relativo al provino DS\_GS25\_330\_55\_3.

Nella Fig. 5.55 è evidente come la rottura del fascio sia avvenuta all'interno della resina che impregnava le fibre esterne.

**SERIE DS\_GS25\_450\_55**

I valori di carico massimo ottenuti con la prova di taglio diretto sono stati rispettivamente di 2.070 kN, 2.044 kN e 2.363 kN. La lunghezza di applicazione del composito FRCM di questo set di provini era di 450 mm. Per questa serie di prove si è reso necessario mostrare nel grafico anche gli spostamenti negativi in quanto durante la fase iniziale della prova, il probabile leggero disassamento del sistema di attacco della fibra alla macchina rispetto al provino, avrebbe generato una leggerissima rotazione dell'angolare applicato alla fibra facendo registrare agli LVDT uno spostamento negativo.

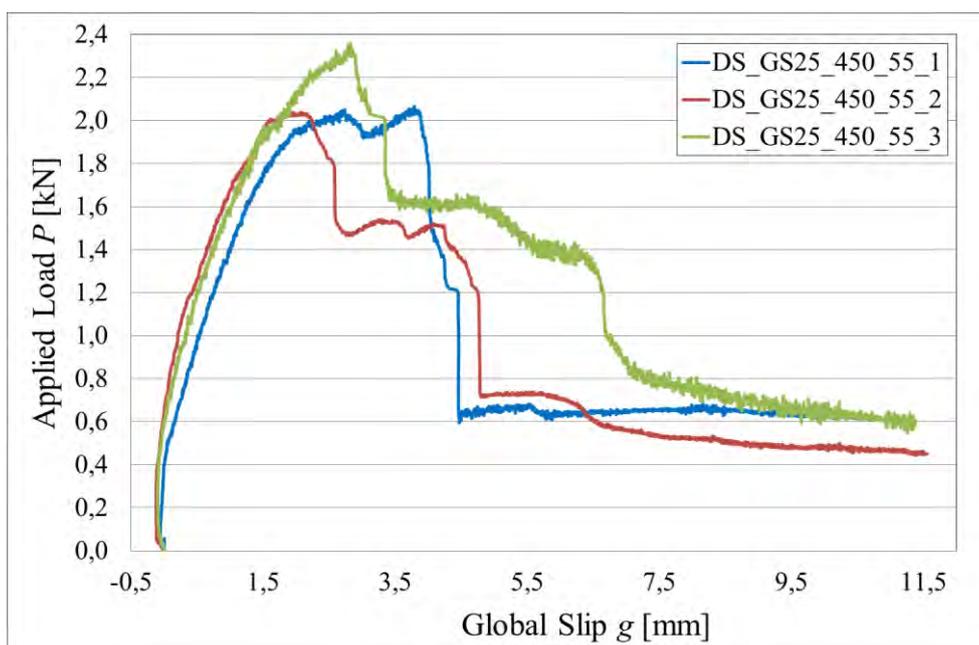


Fig. 5.56 – Risposta di carico per le prove condotte su campioni della serie DS\_GS25\_450\_55.

Per questa serie di provini si notano cadute di carico marcate ma diffuse per i provini \_2 e \_3, mentre per il DS\_GS25\_450\_55\_1 si ha un picco di carico seguito da una diminuzione del carico, per assestarsi al valore degli altri due provini. Queste brusche variazioni si concentrano nell'intervallo di spostamento tra 3.5 mm e 6 mm.

È possibile notare come per tutti i provini di questa serie DS\_GS25\_450 ci sia stata la rottura della fibra nell'interfaccia tra la matrice cementizia e la resina che impregnava la fibra esterna, si veda Fig. 5.57, Fig. 5.58 e Fig. 5.59. In particolare per il provino DS\_GS25\_450\_55\_1 e DS\_GS25\_450\_55\_2 si è arrivati alla rottura di due fasci di fibra: uno centrale e un altro laterale.



Fig. 5.57 – Esito della prova di taglio diretto sul campione DS\_GS25\_450\_1.



Fig. 5.58 – Esito della prova di taglio diretto sul campione DS\_GS25\_450\_2.



Fig. 5.59 – Esito della prova di taglio diretto sul campione DS\_GS25\_450\_3.

### CONCLUSIONI G-NET 251 BA

Si riassumono in una tabella i carichi di picco ottenuti durante le prove con la fibra di vetro appena esposte. Per il calcolo del valore medio, viene scartato il valore di carico meno omogeneo rispetto agli altri. In Fig. 5.60 si mostrano i carichi medi ottenuti per ogni serie relazionati alla lunghezza di aderenza di quella serie.

Provino	L [mm]	P* [kN]	Avg [kN]	
DS_GS25_100_55_1	100	0,476	0,689	valore scartato
DS_GS25_100_55_2	100	0,803		
DS_GS25_100_55_3	100	0,634		
DS_GS25_100_55_4	100	0,632		
DS_GS25_200_55_1	200	0,668	1,179	valore scartato
DS_GS25_200_55_2	200	1,245		
DS_GS25_200_55_3	200	1,031		
DS_GS25_200_55_4	200	1,261		
DS_GS25_330_55_1	330	1,759	1,819	
DS_GS25_330_55_2	330	1,714		
DS_GS25_330_55_3	330	1,984		
DS_GS25_450_55_1	450	2,070	2,159	
DS_GS25_450_55_2	450	2,044		
DS_GS25_450_55_3	450	2,363		

Tab. 5.10 – Tabella riassuntiva dei carichi massimi ottenuti dalle prove di taglio diretto per il gruppo di prove con fibra di vetro G-NET 251 BA e Rock S.

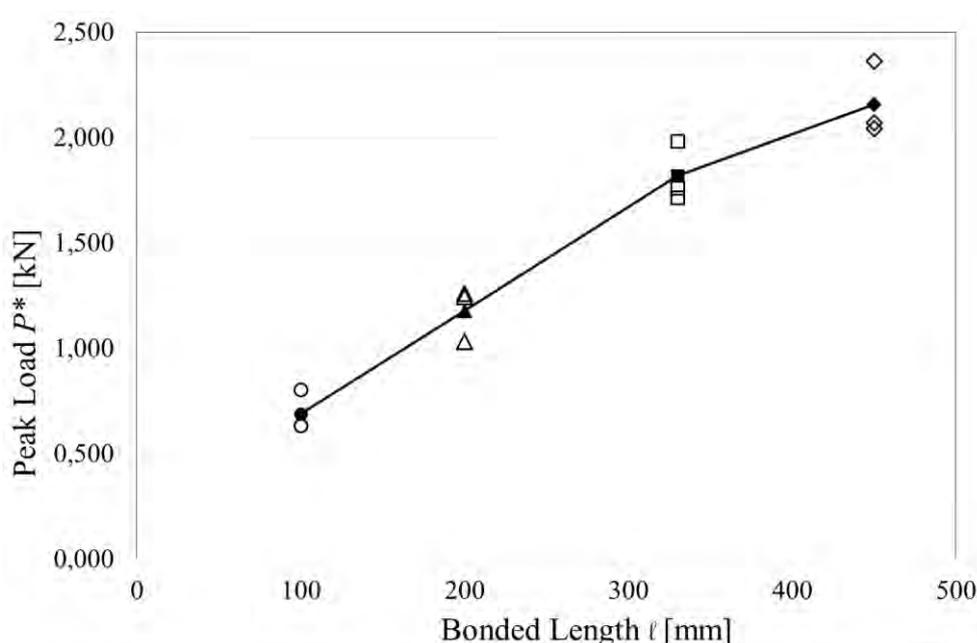


Fig. 5.60 – Andamento del carico di picco  $P^*$  in funzione della lunghezza di incollaggio per G-NET 251 BA.

Viene inoltre ricavata la tensione normale massima  $\sigma^*$  attraverso il rapporto tra il carico di picco e l'area dei 3 fasci interessati nel meccanismo resistente durante la prova di taglio diretto. La

relazione per il calcolo della tensione massima è la stessa utilizzata per il carbonio. Per il valore della sezione della fibra ci si riferisca al §4.3.2.

$$\sigma^* = \frac{P^*}{n \cdot A_{fascio}}$$

Provino	Lunghezza [mm]	p* [kN]	$\sigma^*$ [MPa]	Coefficiente di sfruttamento	
DS_GS25_100_55_1	100	0,476	127	0,18	valore scartato
DS_GS25_100_55_2	100	0,803	214	0,30	
DS_GS25_100_55_3	100	0,634	169	0,24	
DS_GS25_100_55_4	100	0,632	168	0,23	
DS_GS25_200_55_1	200	0,668	178	0,25	valore scartato
DS_GS25_200_55_2	200	1,245	332	0,46	
DS_GS25_200_55_3	200	1,031	275	0,38	
DS_GS25_200_55_4	200	1,261	336	0,47	
DS_GS25_330_55_1	330	1,759	469	0,65	
DS_GS25_330_55_2	330	1,714	457	0,64	
DS_GS25_330_55_3	330	1,984	529	0,74	
DS_GS25_450_55_1	450	2,070	552	0,77	
DS_GS25_450_55_2	450	2,044	545	0,76	
DS_GS25_450_55_3	450	2,363	630	0,88	
Resistenza media G-NET 251 BA [MPa]			718		

Tab. 5.11 – Tabella riassuntiva dei carichi di picco di ogni provino e delle relative tensioni rapportate alla resistenza della fibra G-NET 251 BA.

La tabella inoltre mostra, attraverso il coefficiente di sfruttamento, il grado di utilizzo della fibra nel meccanismo resistente in termini di resistenza. Questo valore viene espresso attraverso il rapporto della tensione alla quale la fibra è sottoposta e il valore di resistenza della fibra stessa, ricavato dai test a trazione precedentemente illustrati. In questo gruppo di prove in esame, in cui si è testato il composito FRCM realizzato con la fibra di vetro G-NET 251 BA, si ottengono valori nettamente superiori a quelli ricavati nei test sul carbonio. Questo indica che per le lunghezze di aderenza più elevate, il vetro è sottoposto a tensioni prossime a quelle di rottura. Il fatto che nonostante il valore massimo ottenuto, pari a 0.88, sia inferiore all'unità, porterebbe a pensare che la fibra di vetro, nonostante la sollecitazione, non sia arrivata a rottura. Dai dati ricavati per la risposta carico-spostamento e dalla documentazione fotografica risulta evidente la brusca rottura di alcuni fasci. La motivazione alla quale si è giunti è che la reale distribuzione delle tensioni tra i tre fasci di fibra interessati nel meccanismo resistente non sia perfettamente omogenea, in quanto il valore di tensione ricavato lo si è calcolato dal rapporto del carico di picco della prova con l'area totale dei tre fasci. In questo modo si è stimato che le tensioni normali si distribuissero in modo equo nella fibra.

# CAPITOLO 6

## CONCLUSIONI

---

### 6.1 CONSIDERAZIONI FINALI

In questa sperimentazione si è cercato di indagare il comportamento di composti fibrorinforzati, in particolar modo di materiali compositi fibrorinforzati a matrice cementizia (FRCM – Fiber Reinforced Cementitious Matrix). Successivamente al breve approccio teorico per comprendere la natura della ricerca si è affrontato l'aspetto sperimentale decisamente più rilevante in termini di dati acquisiti e nozioni apprese. Sono state dunque condotte delle prove sperimentali di taglio diretto su provini di calcestruzzo con due diversi tipi di composito FRCM, uno composto da una rete di fibra di carbonio C-NET 170 BL e malta Rock S come matrice, mentre l'altro utilizzava una rete di fibra di vetro G-NET 251 BA e sempre Rock S come matrice. Per entrambe le applicazioni si è deciso di testare quattro diverse lunghezze di aderenza, inoltre si è approfondito lo studio del comportamento del composito FRCM con la preparazione di ulteriori provini dotati di strain gauges applicati alla fibra di carbonio allo scopo di analizzare la componente deformativa della fibra al procedere della prova di taglio diretto. Attraverso questa indagine si è riusciti a raccogliere dei dati circa il meccanismo di rottura dei due differenti materiali compositi. Di seguito si cercherà di riassumere i dati ricavati.

Le prove sul composito con C-NET 170 BL hanno dato delle risposte in termini di carico spostamento differenti rispetto ad altri studi riportati in letteratura, ma hanno fornito informazioni utili in termini di carico massimo  $P^*$  al variare della lunghezza di applicazione e al comportamento di questo tipo di materiali. In ogni campione con il carbonio, il collasso è avvenuto per scorrimento delle fibre all'interno della matrice cementizia, non si sono verificati danneggiamenti alla fibra esterna, impregnata di resina. Questo aspetto ha indotto a considerare l'efficacia del set-up adottato. Non sono mai stati evidenziati danni nemmeno all'interfaccia matrice-calcestruzzo. Per le lunghezze di applicazione maggiori (330 e 450 mm) è possibile osservare una rottura dei fasci parziali, in quanto solo le fibre esterne risultano danneggiate mentre quelle interne slittavano in

una sorta di guaina formata da quelle esterne. Questo comportamento è associabile alla rottura con effetto telescopico.

L'analisi deformativa, condotta mediante le prove sui due dei tre provini dotati di strain gauges, ha evidenziato un comportamento simile a casi trattati in letteratura. Per un campione, invece, lo strain gauges SG3 avrebbe dovuto misurare una deformazione nettamente superiore a quella registrata. L'alterazione di tale misurazione potrebbe essere stata indotta dalla non corretta adesione dello strain gauges alla fibra centrale.

Nelle prove di taglio diretto condotte su G-NET 251 BA si sono potuti distinguere due comportamenti principali di collasso. Per le lunghezze di aderenza più basse (100 mm e 200 mm) si è assistito ad uno scorrimento della fibra mentre per le più alte (330 mm e 450 mm) è avvenuta la rottura di uno o più fasci, indice del superamento della resistenza a trazione del materiale resistente in esame. La rottura di alcuni fasci ha inoltre portato a considerare il fatto che le tensioni indotte dalla prova di taglio diretto non fossero equamente distribuite tra i fasci del vetro. Tale rottura si è concentrata principalmente all'interno della matrice e all'interfaccia tra matrice e resina esterna. Nonostante ciò, le prove hanno fornito informazioni importanti in merito ai carichi di picco raggiunti e all'interazione matrice-fibra.

Operando un confronto tra le due tipologie di materiali compositi FRCM realizzati e testati, si evince una migliore aderenza della fibra di vetro con la matrice rispetto al carbonio, evidenziando carichi massimi raggiunti leggermente superiori. Di contro, avendo rottura dei fasci, il meccanismo di collasso è avvenuto più bruscamente rispetto al carbonio, riducendo il conseguente potenziale carico dato dall'attrito delle fibre con la matrice.

Relativamente alla sperimentazione mostrata in questo elaborato, di notevole efficacia si è dimostrato il setup utilizzato, in quanto il controllo di velocità della prova ha permesso di analizzare in modo più attendibile la risposta carico applicato-spostamento globale del sistema.

## **6.2 LAVORI FUTURI**

La tecnologia dei compositi FRCM appare un'ottima forma di completamento al panorama dei rinforzi fibrorinforzati in quanto sopperisce ad alcuni difetti intrinseci dei materiali fibrorinforzati a matrice polimerica (FRP). Tali materiali compositi offrono la possibilità di essere impiegati in tutti quei casi in cui si dimostri fondamentale la compatibilità in termini termo

igrometrici e fisico chimici tra il composito e il substrato in calcestruzzo e in cui sia fondamentale la resistenza alle alte temperature. La scarsità di informazioni reperibili in letteratura, però, penalizza la conoscenza di questo tipo di tecnologia e la mancanza di linee guida relative alla progettazione e applicazione ne limita l'utilizzo nell'ambiente professionale. Lo studio appena presentato si propone di migliorare la comprensione, per particolari compositi FRCM, del processo di delaminazione all'interfaccia fibra-matrice e il comportamento in termini di aderenza su un substrato di calcestruzzo. Ad ogni modo le conclusioni dedotte sono attribuibili solamente alla particolare campagna sperimentale descritta in quest'elaborato e non è perciò possibile una loro estensione all'intero panorama dei compositi fibrorinforzati a matrice cementizia. È quindi auspicabile un proseguimento nel campo della sperimentazione atto a creare un quadro completo circa le caratteristiche meccaniche e i campi di utilizzo di questa nuova tecnologia.



# BIBLIOGRAFIA

---

- [1] CNR-DT 200, 2004  
“Istruzioni per la progettazione, l’esecuzione ed il controllo di interventi di consolidamento statico mediante l’utilizzo di composti fibrorinforzati”
- [2] UNI EN 1015-11, 2007  
“Metodi di prova per malte per opere murarie – Parte 11: Determinazione della resistenza a flessione della malta indurita”
- [3] UNI EN 12190, 2000  
“Prodotti e sistemi per la protezione e la riparazione delle strutture di calcestruzzo – Metodi di prova: Determinazione della resistenza a compressione delle malte da riparazione”
- [4] T. D’Antino, C. Carloni, L.H. Sneed, C. Pellegrino – “Matrix-fiber bond behavior in PBO FRCM composites: A fracture mechanics approach” Engineering fracture mechanics, Missouri University of Science and Technology, 21 January 2014
- [5] ASTM D3039  
“Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials”
- [6] L.H. Sneed, T. D’Antino, and C. Carloni – “Investigation of Bond Behavior of PBO Fiber-Reinforced Cementitious Matrix Composite-Concrete Interface” Missouri University of Science and Technology, 2014
- [7] T. D’Antino, C. Pellegrino, C. Carloni, L.H. Sneed, G. Giacomini – “Experimental analysis of the bond behavior of glass, carbon, and steel FRCM composites” University of Padova, Italy, 2013
- [8] T. D’Antino – “Bond behavior in fiber reinforced polymer composites and fiber reinforced cementitious matrix” PhD Thesis, Università di Padova, Italia , 2014
- [9] F. Soldera – “Caratterizzazione meccanica di materiali compositi a matrice cementizia per mezzo di prove di taglio diretto” Tesi di Laurea, Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale, A.A. 2013-2014

- [10] UNI EN 15422, 2008  
“Prodotti prefabbricati per calcestruzzo – Specifica per le fibre di vetro per l’armatura di malte e calcestruzzi”
- [11] L. Sagrito – “Analisi sperimentale degli effetti di temperature elevate sul comportamento strutturale dei rinforzi FRP” Tesi di laurea A.A. 2006-2007
- [12] V. Alvaro – “Materiali compositi a matrice cementizia per i rinforzi strutturali” Tesi di Laurea A.A. 2006-2007

# APPENDICE

---

## ALLEGATO 1

# CONCRETE ROCK S

Sch. Tec. FS37  
LINEA  
FRP SYSTEM  
Consolidamento  
strutturale



## Malta monocomponente tixotropica fibrorinforzata a ritiro compensato e reattività pozzolanica per ripristini strutturali

### Descrizione

CONCRETE ROCK S è una malta monocomponente tixotropica premiscelata a base di leganti inorganici ad alta resistenza, a reattività pozzolanica con leganti polimerici ed aggregati selezionati, fibrorinforzata, pronta all'uso, da mescolare con acqua, per ottenere impasti non segregabili, tixotropici, a ritiro compensato.

CONCRETE ROCK S è in classe R2 ai sensi della EN 1504-3, sviluppa alte resistenze meccaniche, è impermeabile, durevole anche in ambienti aggressivi, garantisce un'elevata adesione alle murature.

CONCRETE ROCK S non contiene parti metalliche, alluminio e cloruri.

### Campi d'impiego

CONCRETE ROCK S è formulato appositamente per effettuare opere di manutenzione, di ripristino strutturale e di restauro in aree industriali, urbane e marine ove le forti concentrazioni di agenti aggressivi causano nel tempo il deterioramento delle murature.

CONCRETE ROCK S trova particolare applicazione in:

- Opere di restauro di murature
- Riparazione di strutture murarie orizzontali e verticali
- Realizzazione di intonaci strutturali armati con reti e tessuti in acciaio, fibre in vetro e sintetiche.

### Vantaggi

CONCRETE ROCK S è di facile miscelazione e posa in opera; si applica a cazzuola o a spruzzo, in spessori fino a 3 cm. in un unico strato, con un minimo di 0,5 cm; per spessori maggiori si raccomanda di effettuare l'applicazione a strati sovrapposti.

CONCRETE ROCK S non presenta cavillature o fessurazioni da ritiro plastico come le tradizionali malte cementizie.

CONCRETE ROCK S ha un'elevata compattezza, bassa porosità capillare, ottima impermeabilità e resistenza ai cicli di gelo e disgelo, ai solfati e agli olii lubrificanti.

Le proprietà meccaniche di CONCRETE ROCK S consentono di effettuare opere di ripristino altamente affidabili e durature nel tempo, riducendo notevolmente i costi di manutenzione.

### Dati tecnici (Classe R2-UNI EN 1504-3)

Resa	ca. 1500 kg/m <sup>3</sup>
Acqua d'impasto	19% in peso sulla polvere
Tempo di lavorabilità (20°C e 65% U.R.)	> 60 min.
Contenuto ioni cloruro	< 0,05%
Resistenza a compressione a 28 g	25 N/mm <sup>2</sup> (Classe R3)
Modulo elastico a 28 g	15.000 N/mm <sup>2</sup> ca. (Classe R3)
Aderenza al mattone a 28 g	> 0,6 N/mm <sup>2</sup>
Permeabilità al vapore acqueo $\mu$	20
Assorbimento capillare	< 0,5 kg m <sup>-2</sup> h <sup>-0,5</sup>
Reazione al fuoco EN 1015-1	classe A1
Resistenza ai cicli di gelo e disgelo	resistente
Resistenza ai solfati	nessun degrado dopo attacco in solfato di magnesio
Resistenza all'attacco degli olii lubrificanti	nessun degrado dopo immersione in olio a 40°C per 60 g
Essudamento d'acqua (bleeding)	assenza d'acqua essudata
Temperatura di applicazione	da +5 °C a +40 °C

## Istruzioni per l'impiego

### Preparazione del sottofondo

Rimuovere tutte le parti ammalorate e incoerenti dell'area interessata al ripristino, ivi compreso il latte di cemento. Eliminare impregnazioni di olii, grassi, vernici, calce, polvere, sporco, ecc. anche a mezzo di idrolavaggio a pressione.

Irruvidire la superficie a mezzo spazzole metalliche o altri idonei sistemi.

Per la protezione dei ferri d'armatura, dopo la pulizia meccanica, si consiglia di applicare il trattamento passivante FERROSAN o RESIN 78. Qualora la sezione dei ferri d'armatura dopo la pulizia risultasse inferiore alla sezione originaria provvedere al reintegro con saldatura di ferri aggiuntivi. E' buona norma bagnare a saturazione la superficie di ripristino prima dell'applicazione della malta. Rimuovere l'acqua in eccesso.

### Preparazione della malta

La miscelazione della malta CONCRETE ROCK S viene effettuata in una normale betoniera di cantiere. Immettere nella betoniera 2/3 dell'acqua d'impasto richiesta (ca. 3 l per sacco da 25 kg) e versare la polvere poco per volta senza interruzioni. Continuare la miscelazione aggiungendo l'ultimo 1/3 di acqua (1,6 l ca.) per almeno 2-3 minuti fino ad ottenere un impasto omogeneo e privo di grumi.

Per preparare piccole quantità di prodotto utilizzare un miscelatore meccanico a basso numero di giri. Evitare di preparare l'impasto manualmente.

Non aggiungere acqua oltre i limiti indicati in specifica.

### Posa in opera della malta

CONCRETE ROCK S miscelato come sopra indicato, può essere messo in opera a spatola o cazzuola. E' possibile l'applicazione a spruzzo a mezzo pompa per via umida.

Per riporti in più strati attendere dai 60 ai 120 min. in funzione della temperatura esterna.

Lo spessore massimo per passata non deve superare i 3 cm. Spessore minimo 0,5 cm.

La finitura non deve essere eseguita con frattazzo di ferro o cazzuola, ma esclusivamente con frattazzo di legno, plastica o gomma e mediamente entro 1 ora in funzione della temperatura esterna

### Stagionatura

In giornate ventose e nella stagione calda è raccomandato proteggere la malta stesa da una rapida evaporazione dell'acqua d'impasto mantenendo un adeguato livello di umidità a mezzo bagnatura o protezione con teli per almeno 24-48 ore.

### Consumi

La resa di CONCRETE ROCK S è di ca. 15 kg per cm di spessore

### Colore

Grigio

### Confezioni

Sacchi da kg 25 in bancali da kg 1500.

### Immagazzinaggio

CONCRETE ROCK S si conserva negli imballi originali sigillati ed in ambiente asciutto per almeno 12 mesi.

### Voce di capitolato

#### Tipo di intervento

Realizzazione di intonaci strutturali armati per murature con reti e tessuti in acciaio e fibre sintetiche.

#### Specifiche tecniche

Fornitura e posa in opera, dopo idonea preparazione del supporto, di una malta monocomponente a reattività pozzolanica fibrinforzata a ritiro compensato priva di espansivi metallici e cloruri, pronta all'uso, ad alta resistenza meccanica, resistente all'azione aggressiva dell'ambiente, ai solfati e al gelo/disgelo, tipo CONCRETE ROCK S. L'applicazione del prodotto avverrà a mezzo cazzuola, spatola o pompa per via umida per spessori per mano non superiori ai 3 cm. L'armatura, in funzione delle caratteristiche, potrà essere inserita in via preventiva sulla muratura e fissata a mezzo chiodature oppure inserita nel primo strato di malta fresca e successivamente ricoperta completamente con un secondo strato di malta fino allo spessore di progetto.



G&P intech s.r.l.  
via Retrone 39 - 36077 Altavilla Vicentina (VI)  
Tel. 0444 522797 - Fax 0444 348692  
E mail: info@gpintech.com - www.gpintech.com

Copyright 2013 - Tutti i diritti sono riservati

Rev. FS37/01/13

Le indicazioni contenute nel presente documento tecnico rispondono in modo reale e veritiero alle nostre migliori e attuali conoscenze. In funzione dell'attenzione e accuratezza delle diverse fasi di posa in opera sulle quali non abbiamo alcuna responsabilità, possono verificarsi delle variazioni. La nostra garanzia si limita pertanto alla qualità e costanza del prodotto fornito di cui alle indicazioni riportate.

## ALLEGATO 2

# C-NET 170BL C-NET 220BL

**Reti in fibra di carbonio per  
rinforzo strutturale**

**Descrizione**  
C-NET 170BL e 220BL bidirezionali sono reti in fibra di carbonio per il consolidamento da impiegare con malte strutturali cementizie ed in calce.

**Dati Tecnici**

	C-NET 170BL	C-NET 220BL
Grammatura rete in carbonio	170 g/m <sup>2</sup>	220 g/m <sup>2</sup>
Dimensione maglia	17x20 mm	17x20 mm
Spessore nominale rete	0,047 mm*	0,061 mm*
Resistenza a trazione filamento	4700 N/mm <sup>2</sup>	4700 N/mm <sup>2</sup>
Modulo elastico a trazione filamento	240 GPa	240 GPa
Allungamento ultimo a trazione filamento	1,8%	1,8%
Resistenza a trazione alla deformazione del 7,5‰	89 kN/m*	115 kN/m*

\* per direzione 0°/90°

**Campi di impiego**  
Le reti C-NET 170BL e C-NET 220BL presentano una grande flessibilità di impiego e sono idonee ad essere utilizzate nel rinforzo di strutture in c.a., c.a.p. ed in muratura, sia con malte idrauliche strutturali della linea CONCRETE ROCK o in calce e pozzolana della linea LIMECRETE.

**Istruzioni per l'impiego**  
Le reti C-NET 170BL e C-NET 220BL vengono posate sulla malta fresca e inglobate nella stessa. L'ulteriore passata di malta deve avvenire prima del completo indurimento del primo strato. Per l'ulteriore ancoraggio della rete al supporto, su indicazione della D.L., possono essere posizionati gli specifici connettori AFIX in fibra aramidica e CFIX in fibra di carbonio fissati alle reti con adesivo RESIN 75 o RESIN 78 idrocompatibile. Applicare uno spolvero di quarzo sull'adesivo prima della stesura della malta di ricoprimento (cfr. Sch. Tec. FS01-FS02).

Consultare l'ufficio tecnico dell'Azienda per eventuale assistenza.

Sch. Tec. FS06-170BL/220BL

**LINEA  
FRP SYSTEM**  
Consolidamento  
strutturale






### Confezioni

Rotoli da 50 m<sup>2</sup>; altezza 100 cm - lunghezza 50 m.

### Immagazzinaggio

Conservare il prodotto in luogo asciutto e riparato.



**G&P intech** s.r.l. - via Retrone 39  
36077 Altavilla Vicentina (VI) - ITALY  
Tel. +39 0444.522797 - Fax +39 0444.348692  
E mail: [info@gpintech.com](mailto:info@gpintech.com)  
[www.gpintech.com](http://www.gpintech.com)

Copyright 2013 – Tutti i diritti sono riservati

Rev. FS06-170BL/220BL/02/13

Le indicazioni contenute nel presente documento tecnico rispondono in modo reale e veritiero alle nostre migliori e attuali conoscenze. In funzione dell'attenzione e accuratezza delle diverse fasi di posa in opera sulle quali non abbiamo alcuna responsabilità, possono verificarsi delle variazioni. La nostra garanzia si limita pertanto alla qualità e costanza del prodotto fornito di cui alle indicazioni riportate.

## ALLEGATO 3

Sch. Tec. FS08-251BA

**LINEA**  
**FRP SYSTEM**  
Consolidamento  
strutturale

# G-NET 251BA

### Rete in fibra di vetro AR alcali resistente apprettata

**Descrizione**

G-NET 251 BA è una rete di rinforzo in vetro AR per l'impiego con malte cementizie e in calce strutturale. La fibra utilizzata per la rete G-NET 251 BA AR presenta un elevato contenuto in ossido di zirconio >16% (la fibra è classificata AR ai sensi della Norma UNI EN 15422) che conferisce alla rete un'elevata resistenza agli ambienti alcalini, tipici delle malte cementizie e delle calci.

La fibra presenta inoltre uno speciale trattamento superficiale (appretto), che ne migliora la compatibilità e l'adesione al supporto.

**Dati Tecnici**

Grammatura	250 g/m <sup>2</sup>
Dimensione maglia	25 mm
Spessore fibra per direzione	0,05 mm
Resistenza a trazione filamento	>2000 MPa
Carico di rottura per direzione	46/50 kN/m
Modulo elastico a trazione filamento	70 GPa
Allungamento a rottura filamento	>3%



### Campi di impiego

La rete G-NET 251 BA presenta una grande flessibilità di impiego ed è idonea ad essere utilizzata in particolare nel rinforzo delle murature sia con malte cementizie linea CONCRETE ROCK e RASDIL sia con calci strutturali linea LIMECRETE.

### Istruzioni per l'impiego

La rete G-NET 251 BA viene posata sulla malta fresca e inglobata nella stessa. L'ulteriore passata di malta deve avvenire prima del completo indurimento del primo strato. Per l'ulteriore ancoraggio della rete al supporto, su indicazione della D.L., possono essere posizionati gli specifici connettori AFIX in fibra aramidica o GFIX in fibra di vetro, fissati alla rete con adesivo RESIN 75 o RESIN 78 idrocompatibile. Applicare uno spolvero di quarzo sull'adesivo prima della stesura della malta di ricoprimento (cfr. Sch.Tec. FS02).

Consultare l'ufficio tecnico dell'azienda per eventuale assistenza.



### Confezioni

Rotoli da 50 m<sup>2</sup>: altezza 100 cm - lunghezza 50 m.

### Immagazzinaggio

Conservare il prodotto in luogo asciutto e riparato.



G&P intech s.r.l.  
via Retrone 39 - 36077 Altavilla Vicentina (VI)  
Tel. 0444 522797 - Fax 0444 348692  
E mail: info@gpintech.com - www.gpintech.com

Copyright 2013 - Tutti i diritti sono riservati

Le indicazioni contenute nel presente documento tecnico rispondono in modo reale e veritiero alle nostre migliori e attuali conoscenze. In funzione dell'attenzione e accuratezza delle diverse fasi di posa in opera sulle quali non abbiamo alcuna responsabilità, possono verificarsi delle variazioni. La nostra garanzia si limita pertanto alla qualità e costanza del prodotto fornito di cui alle indicazioni riportate.

Rev. FS08-251BA/02/13

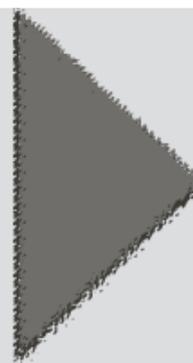
## ALLEGATO 4

## RESIN 70-75

Sch. Tec. FS 11

LINEA  
FRP SYSTEM

Consolidamento strutturale



## Adesivi epossidici per incollaggi strutturali

## Descrizione

RESIN 70 E 75 sono formulati bicomponenti a base di resine epossidiche, privi di solventi, diluenti e plastificanti particolarmente indicati come incollaggi strutturali per calcestruzzo e materiali da costruzione e per il sistema FRP SYSTEM.

RESIN 70 E 75 hanno un'elevata adesione e tixotropia (versione 75) e sono esenti da ritiro per tutti i materiali da costruzione con particolare riferimento a malte, calcestruzzi, murature, laminati sintetici, acciaio.

## Campi d'impiego

RESIN 70 E 75 vengono impiegati come adesivi strutturali nel settore dell'edilizia e delle infrastrutture per: incollaggio di elementi prefabbricati in calcestruzzo anche portanti, incollaggio di elementi ammalorati nella ristrutturazione del calcestruzzo, delle murature, del legno e dell'acciaio, incollaggio strutturale di Lamelle CFK in carbonio e di tessuti in carbonio, aramide, vetro nel ciclo FRP SYSTEM, primerizzazione e protezione dei ferri d'armatura ove necessario. RESIN 70 E 75 presentano caratteristiche tecniche e meccaniche elevate per impieghi specifici nel settore dei rinforzi strutturali.

## Vantaggi

I principali vantaggi degli adesivi RESIN 70 E 75 sono: versatilità di impiego per ogni tipo di materiale in uso in edilizia, elevato potere adesivo, assenza di ritiro, buone caratteristiche meccaniche, ottima resistenza chimica all'acqua, ai sali, agli idrocarburi, a soluzioni aggressive acide e basiche.

## Dati Tecnici

	Resin 70	Resin 75(**)
Peso specifico	1,05 g/cm <sup>3</sup>	1,10 g/cm <sup>3</sup>
Pot life a 20°C (*)	40 min.	50 min.
Fuori tatto a 20°C	6 h	7 h
Indurimento completo a 20°C	7 g	7 g
Resistenza alla compressione	56 N/mm <sup>2</sup>	58 N/mm <sup>2</sup>
Resistenza alla flessione	35 N/mm <sup>2</sup>	35 N/mm <sup>2</sup>
Resistenza alla trazione	40 N/mm <sup>2</sup>	40 N/mm <sup>2</sup>
Modulo elastico	2300 N/mm <sup>2</sup>	2400 N/mm <sup>2</sup>
Adesione al calcestruzzo	>2,5 N/mm <sup>2</sup>	> 2,5 N/mm <sup>2</sup>
Temperatura minima di applicazione	10°C	10°C

(\*) Al variare della quantità miscelata e della temperatura il pot life può cambiare.

(\*\*) Resin 75 adesivo tixotropico.

## Istruzioni per l'impiego

## Preparazione del supporto

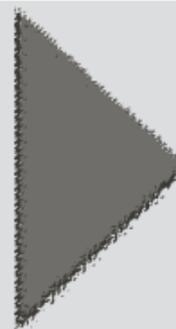
Le aree sulle quali viene applicato l'adesivo devono essere sane, pulite, esenti da polvere, lattime di cemento, olii, grasso, sporco, ecc. Può essere necessario operare con bruschinatura, sabbatura, pallinatura del supporto o utilizzare altri idonei sistemi di pulizia.

Il supporto deve poi avere una adeguata resistenza meccanica al fine di consentire all'adesivo di sviluppare al meglio le proprie caratteristiche meccaniche.

Nell'utilizzo degli adesivi per impieghi strutturali FRP SYSTEM è particolarmente importante definire le caratteristiche meccaniche del supporto attraverso prove di pull off del tipo raccomandate dalla ASTM D 4541 "adhesion test".

I valori di pull off riscontrati caratterizzano il supporto e ne determinano le condizioni per un corretto rinforzo con FRP SYSTEM ai sensi delle linee guida CNR DT 200/2004 e succ.

A titolo esemplificativo, ma non esaustivo, per un calcestruzzo soggetto a rinforzo a flessione con FRP, valori di pull off inferiori a 1,2 MPa richiedono in generale un adeguato preconsolidamento prima dell'applicazione dei rinforzi.



### Miscelazione dei componenti

I componenti il sistema epossidico nel rapporto di catalisi indicato nelle confezioni, vanno miscelati in un apposito contenitore preferibilmente con un agitatore meccanico a basso numero di giri fino ad ottenere un prodotto omogeneo. Evitare di mescolare alla volta quantità eccessive di prodotto, oltre comunque i quantitativi delle singole confezioni.

### Posa in opera

RESIN 70 ha una consistenza fluida, mentre RESIN 75 ha una consistenza tixotropica. Gli adesivi vengono applicati a mezzo rullo o pennello. In taluni casi per superfici molto porose può essere opportuno applicare preventivamente all'adesivo un primer epossidico tipo RESIN PRIMER e attendere la sua asciugatura.

Per l'impiego nel FRP SYSTEM l'adesivo viene impiegato come collante strutturale. Nel caso di impiego su tessuti FRP Sheet, CTU,CTB in carbonio, aramide e vetro la fibra va posta sull'adesivo fresco.

La fibra viene quindi accuratamente rullata esercitando una adeguata pressione al fine di consentire una perfetta impregnazione dell'adesivo. Successivamente sull'adesivo fuori tatto viene steso un ulteriore strato di resina a saturazione.

La temperatura minima di applicazione è di 10°C.

### Consumi

In generale il consumo dipende dalle caratteristiche dell'intervento.

Per l'uso come adesivo strutturale nel FRP SYSTEM consultare l'apposita scheda tecnica.

### Colore

Trasparente-ambrato.

### Confezioni

RESIN 70 E 75 sono confezionati in imballi idonei per l'uso professionale e per il trasporto. Per le quantità fare riferimento alle indicazioni sulle confezioni.

### Immazzinaggio

RESIN 70 E 75 si conservano nei loro imballi sigillati originali ed in ambiente asciutto e riscaldato per almeno 12 mesi.

Proteggere dal gelo.

### Precauzioni

Usare guanti di gomma durante le lavorazioni. Evitare il contatto della resina con la pelle, le mucose e gli occhi. Usare occhiali da lavoro infrangibili.

In caso di contatto accidentale lavare abbondantemente la parte imbrattata con acqua e sapone neutro.

Non utilizzare solventi per lavarsi mani, braccia e altre parti del corpo.

Nel caso di spruzzi di resina negli occhi provvedere al loro lavaggio immediatamente con acqua corrente e rivolgersi ad un oculista informandolo del tipo e natura della sostanza che ha causato l'inconveniente.

Per altre informazioni fare riferimento alla scheda di sicurezza dei prodotti.



G&P intech s.r.l.  
via Retrone 39 - 36077 Altavilla Vicentina (VI)  
Tel. 0444 522797 - Fax 0444 348692  
E mail: info@gpintech.com - www.gpintech.com

PARTNER UFFICIALE  
DEL GRUPPO INTERNAZIONALE 

Copyright 2011 – Tutti i diritti sono riservati

Rev. FS11/01/11

Le indicazioni contenute nel presente documento tecnico rispondono in modo reale e veritiero alle nostre migliori e attuali conoscenze. In funzione dell'attenzione e accuratezza delle diverse fasi di posa in opera sulle quali non abbiamo alcuna responsabilità, possono verificarsi delle variazioni. La nostra garanzia si limita pertanto alla qualità e costanza del prodotto fornito di cui alle indicazioni riportate.

ALLEGATO 5



**Dehnungsmessstreifen**  
**Strain gages**  
**Jauges d'extensométrie**

Widerstand  
Resistance  
Résistance 120 Ω ±0.35 %

k-Faktor  
Gage factor  
Facteur k 1.99 ±1.0 %

Querempfindlichkeit  
Transverse sensitivity  
Sensibilité transverse 0.1 %

Bestellnummer  
Order No.  
No. de référence

1-LY11-3/120

Typ  
Type  
Type

3/120 LY11

Stückzahl  
Contents  
Quantité

10

Temperaturkoeffizient  
des k-Faktors  
Temperature coefficient  
of gage factor  
Coefficient de température  
du facteur k

93 ±10 [10<sup>-6</sup> / K]  
(-10°C ... +45°C)

Folienlos  
Foil lot  
Lot de la feuille

A417/49

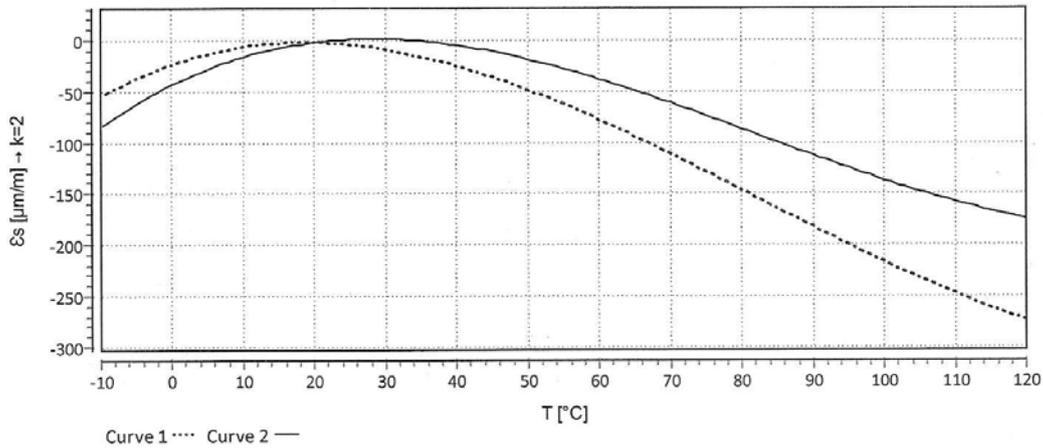
Herstellungslös  
Production batch  
Lot de fabrication

812061844

Daten / Data / Données

Temperaturkompensation: Ferritischer Stahl mit  
Temperature compensation: steel with  
Compensation de température: acier avec

$$\alpha = 10.8 [10^{-6} / K]$$



$$\epsilon_s(T) = -22.61 + 2.42 * T - 7.35E-02 * T^2 + 2.99E-04 * T^3 \pm (T-20) * 0.30 [\mu\text{m/m}] + 0.03330 * L * (T-20) [\mu\text{m/m}]$$

Alle technischen Daten nach OIML IR 62, bei Beachtung der abweichenden Toleranzangaben auch nach VDI/VDE 2635. Geben Sie bei Rückfragen bitte Bestellnummer und Herstellungslös an.

All specifications in accordance with OIML IR 62, also compliant with VDI/VDE 2635 if deviating tolerances are observed. In case of further inquiries please indicate order no. and production batch number.

Toutes caractéristiques techniques selon OIML IR 62 et VDI/VDE 2635 pour les indications différentes de tolérance. Pour toutes questions, indiquer le no. de référence ainsi que le lot de fabrication.

Réponse en température des jauges d'extensométrie appliquées sur des matériaux dont des coefficients de dilatation thermique  $\alpha$  sont indiqués. Mesurée à variation continue de la température.

**Curve 1:** Jauges sans pattes de raccordement.

**Curve 2:** Jauges avec pattes de raccordement (longueur unitaire de la patte de 30 mm). Lorsque les pattes sont plus courtes, la réponse en température se trouvera entre les deux courbes 1 et 2. La représentation numérique permet de calculer exactement la réponse en température pour chaque longueur de patte.  
T = température en °C L = longueur unitaire de la patte en mm (sans dimension)

**Temperaturgang** der Dehnungsmessstreifen bei Applikationen mit oben angegebenen Wärmeausdehnungskoeffizienten  $\alpha$ . Gemessen bei kontinuierlicher Temperaturänderung.

**Kennlinie 1:** DMS ohne Anschlussbändchen.

**Kennlinie 2:** DMS mit Anschlussbändchen (30mm einfache Bändchenlänge). Bei gekürzten Bändchen liegt der Temperaturgang zwischen Kennlinie 1 und 2. Die numerische Darstellung erlaubt, den Temperaturgang für jede Bändchenlänge exakt zu errechnen.  
T = Temperatur in °C L = einfache Bändchenlänge in mm (dimensionslos)

The temperature response refers to strain gages bonded to materials with specified coefficients of thermal expansion  $\alpha$ . Values are measured with continuous temperature variation.

**Curve 1:** Strain gages without leads.

**Curve 2:** Strain gages with leads (simple lead length of 30 mm). If the leads are shorter, the temperature response lies between curve 1 and 2. The numeric representation allows exact calculation of the temperature response for any lead length.  
T = temperature in °C L = simple lead length in mm (dimensionless)

Kopfdaten / Header / Titre



A point (".") is used as decimal separator in data; the separator needs to be configured accordingly for import into Excel.